

INTRODUÇÃO ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: CONCEITOS E OCORRÊNCIAS NO BRASIL

Data de aceite: 03/07/2023

Thyago Anthony Soares Lima

Universidade Estadual de Feira de
Santana (UEFS)
<http://lattes.cnpq.br/1714186197608991>
<https://orcid.org/0000-0002-4607-2953>

Paulo de Tarso Amorim Castro

Universidade Federal de Ouro Preto
(UFOP)
<http://lattes.cnpq.br/7247198559551536>
<https://orcid.org/0000-0002-7667-0161>

RESUMO: Apresenta-se aqui uma introdução aos conceitos básicos das águas subterrâneas, descrevendo a ocorrência, o volume e a qualidade dessas águas, bem como o uso e a exploração das mesmas. São abordados os diferentes tipos de aquíferos e suas funções, além de se discutir as áreas de reabastecimento e descarga dos aquíferos. Apresenta-se ainda uma visão geral das principais ocorrências de aquíferos no Brasil. São apresentados conceitos teóricos fundamentais, como a definição de aquífero, recarga e descarga, bem como o papel da litologia na formação dos aquíferos. Este conteúdo é fundamental para o entendimento das águas subterrâneas como recurso hídrico,

fornecendo informações importantes para gestores públicos e privados, bem como para a população em geral, na busca por uma gestão adequada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

PALAVRAS-CHAVE: Águas Subterrâneas, Aquíferos, Hidrogeologia, Brasil

INTRODUCTION TO GROUNDWATER: CONCEPTS AND OCCURRENCES IN BRAZIL

ABSTRACT: Here is an introduction to the basic concepts of groundwater, describing the occurrence, volume, and quality of these waters, as well as their use and exploitation. The different types of aquifers and their functions are addressed, as well as the recharge and discharge areas of the aquifers. An overview of the main occurrences of aquifers in Brazil is also presented. Fundamental theoretical concepts are presented, such as the definition of aquifer, recharge and discharge, as well as the role of lithology in aquifer formation. This content is essential for understanding groundwater as a water resource, providing important information for public and private managers, as well as the general population, in the search for

adequate and sustainable management of groundwater resources.

KEYWORDS: Groundwater, Aquifers, Hydrology, Brazil

1 | ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A água subterrânea é toda a água que ocorre abaixo da superfície da Terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas, e desempenha um papel essencial na manutenção da umidade do solo e do fluxo dos rios, lagos e brejos, estando envolvida em uma fase do ciclo hidrológico ao constituir uma parcela da água precipitada (Borghetti et al., 2004).

Após a precipitação, parte das águas que atinge o solo infiltra-se e percola no interior do subsolo, em períodos de tempo extremamente variáveis, que dependem de muitos fatores, tais como:

- **Porosidade do subsolo:** a presença de argila no solo diminui sua permeabilidade, não permitindo uma grande infiltração;
- **Cobertura vegetal:** um solo coberto por vegetação é mais permeável do que um solo desmatado;
- **Inclinação do terreno:** em declividades acentuadas a água corre mais rapidamente, diminuindo a possibilidade de infiltração;
- **Tipo de chuva:** chuvas intensas saturam rapidamente o solo, ao passo que chuvas finas e demoradas têm mais tempo para se infiltrarem.

Durante a infiltração, uma parcela da água fica retida nas regiões mais próximas da superfície do solo, constituindo a zona não saturada, enquanto outra parcela atinge as zonas mais profundas do subsolo, constituindo a zona saturada, sob a ação da força de adesão ou de capilaridade e da gravidade, respectivamente (Tundisi, 2005). Como é possível observar no modelo conceitual da Figura 1.

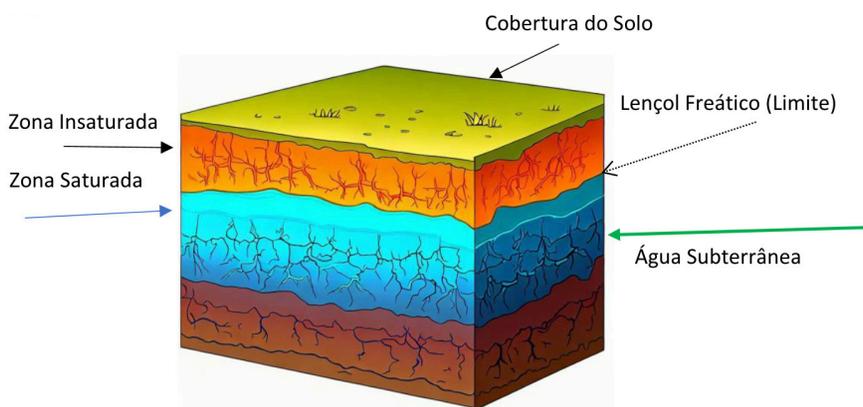


Figura 1- Modelo conceitual das zonas não saturada e saturada no subsolo.

Fonte: O autor.

Durante esse processo a água é mantida perto das partículas superficiais da rocha, pela atração molecular, sejam estas rochas sedimentares ou não. (Figura 2). O divisor limite do nível da linha de água, passa a ser chamado de lençol freático, e todas as aberturas abaixo deste limite estarão teoricamente cheias de águas subterrâneas.

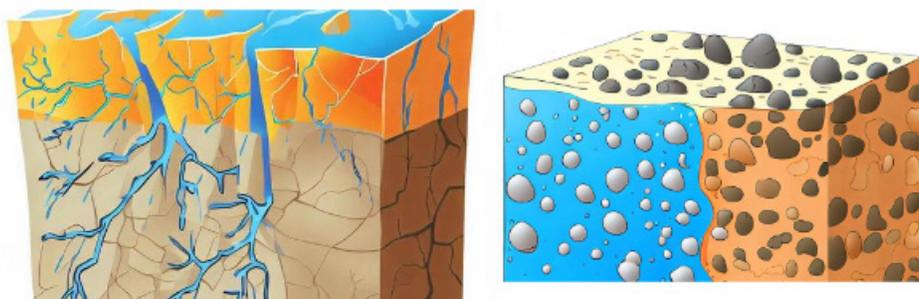


Figura 2 - Caracterização Esquemática do comportamento da Água em Zonas Saturadas.

Fonte: O Autor.

Zona Insaturada: Também chamada de zona não saturada, zona de aeração ou vadosa, é a parte do solo que está parcialmente preenchida por água. Nesta zona, pequenas quantidades de água distribuem-se uniformemente, sendo que suas moléculas aderem às superfícies dos grãos do solo. Nesta zona ocorrem os fenômenos de transpiração pelas raízes das plantas, filtração e autodepuração da água (Freeze et al., 1979). Dentro desta zona encontram-se:

- *Zona de umidade do solo:* é a parte mais superficial, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. Em alguns casos, é muito grande a quantidade de sais que se precipitam na superfície do solo após a evaporação dessa água, dando origem a solos salinizados ou a crostas ferruginosas (lateríticas). Esta zona serve de suporte fundamental da biomassa vegetal natural ou cultivada da Terra e da interface atmosfera/litosfera (Freeze et al., 1979).
- *Zona intermediária:* região compreendida entre a zona de umidade do solo e a franja capilar, com umidade menor do que nesta última e maior do que a da zona superficial do solo. Em áreas onde o nível freático está próximo da superfície, a zona intermediária pode não existir, pois a franja capilar atinge a superfície do solo. São brejos e alagadiços, onde há uma intensa evaporação da água subterrânea (Freeze et al., 1979).
- *Franja de capilaridade:* é a região mais próxima ao nível d'água do lençol freático, onde a umidade é maior devido à presença da zona saturada logo abaixo (Freeze et al., 1979).

Zona saturada: é a região abaixo da zona não saturada onde os poros ou fraturas da rocha estão totalmente preenchidos por água. As águas atingem essa zona por

gravidade, através dos poros ou fraturas, até alcançar uma profundidade limite, onde as rochas estão tão saturadas que a água não pode penetrar mais. Para que haja infiltração até a zona saturada, é necessário primeiro satisfazer as necessidades da força de adesão na zona não saturada. Nessa zona, a água corresponde ao excedente de água da zona não saturada que se move em velocidades muito lentas (em/dia), formando o manancial subterrâneo propriamente dito. Uma parcela dessa água irá desaguar na superfície dos terrenos, formando as fontes e os olhos d'água. A outra parcela desse fluxo subterrâneo forma o caudal basal que deságua nos rios, perenizando-os durante os períodos de estiagem, com uma contribuição multianual média da ordem de 13.000 km³/ano (Peixoto e Oort, 1990), ou deságua diretamente nos lagos e oceanos. A superfície que separa a zona saturada da zona de aeração é chamada de nível freático, ou seja, esse nível corresponde ao topo da zona saturada (IGM, 2001).

Dependendo das características climatológicas da região ou do volume de precipitação e escoamento da água, esse nível pode permanecer permanentemente a grandes profundidades ou se aproximar da superfície horizontal do terreno, originando as zonas encharcadas ou pantanosas, ou convertendo-se em mananciais (nascentes) quando se aproxima da superfície através de um corte no terreno (Rebouças, 1996).

2 I OCORRÊNCIA E VOLUME DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Assim como a distribuição das águas superficiais é muito variável, a das águas subterrâneas também o é, uma vez que elas se inter-relacionam no ciclo hidrológico e dependem das condições climatológicas. Entretanto, as águas subterrâneas (10.360.230 km³) são aproximadamente 100 vezes mais abundantes do que as águas superficiais dos rios e lagos (92.168 km³). (WSS 2019).

Embora estejam armazenadas nos poros e fissuras milimétricas das rochas, as águas subterrâneas ocorrem em grandes extensões, gerando volumes significativos de água subterrânea da ordem de aproximadamente 23.400.000 km³, distribuídos em uma área aproximada de 134,8 milhões de km² (Shiklomanov,1998; Hanasaki et al., 2020), constituindo-se em importantes reservas de água doce.

Alguns especialistas indicam que a quantidade de água subterrânea pode chegar a até 60 milhões de km³, mas sua ocorrência em grandes profundidades pode impossibilitar seu uso. Por essa razão, a quantidade passível de ser captada estaria a menos de 4.000 metros de profundidade, compreendendo cerca de 8 e 10 milhões de km³ (CEPIS, 2000), que, segundo Rebouças et al. (2002), estaria assim distribuída: 65.000 km³ constituindo a umidade do solo; 4,2 milhões de km³ desde a zona não-saturada até 750 m de profundidade e 5,3 milhões de km³ de 750 m até 4.000 m de profundidade, constituindo o manancial subterrâneo.

Além disso, a quantidade de água capaz de ser armazenada pelas rochas e pelos materiais não consolidados em geral depende da porosidade dessas rochas, que pode chegar a até 45% (IGM, 2001), da comunicação desses poros entre si ou da quantidade e tamanho das aberturas de fraturas existentes.

No Brasil, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2021), as reservas de água subterrânea são estimadas em 110.000 km³ (110 trilhões de m³) e a contribuição multianual média à descarga dos rios é da ordem de 2.850 km³/ano. Nem todas as formações geológicas possuem características hidrodinâmicas que possibilitem a extração econômica de água subterrânea para atendimento de médias e grandes vazões pontuais. As vazões já obtidas por poços variam, no Brasil, desde menos de 1 m³/h até mais de 2.000 m³/h (ANA, 2021).

3 I QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Durante o percurso em que a água percola entre os poros do subsolo e das rochas, ocorre a depuração da mesma por meio de uma série de processos físico-químicos (troca iônica, decaimento radioativo, remoção de sólidos em suspensão, neutralização de pH em meio poroso, entre outros) e bacteriológicos (eliminação de micro-organismos devido à ausência de nutrientes e oxigênio que os viabilizem), que atuam sobre a água, modificando as suas características adquiridas anteriormente e tornando-a particularmente mais adequada para o consumo humano (Silva, 2003; Albuquerque et al., 2020).

Sendo assim, a composição química da água subterrânea é o resultado combinado da composição da água que entra no solo e da evolução química influenciada diretamente pelas litologias atravessadas. O teor de substâncias dissolvidas nas águas subterrâneas aumenta à medida que elas se movem (SMA,2003; Sousa et al., 2018).

As águas subterrâneas apresentam algumas propriedades que tornam o seu uso mais vantajoso em relação ao das águas dos rios: são filtradas e purificadas naturalmente por meio da percolação, o que determina excelente qualidade e dispensa tratamentos prévios; não ocupam espaço em superfície; sofrem menor influência das variações climáticas; são passíveis de extração perto do local de uso; possuem temperatura constante; têm maior quantidade de reservas; necessitam de custos menores como fonte de água; suas reservas e captações não ocupam área superficial; apresentam grande proteção contra agentes poluidores; o uso do recurso aumenta a reserva e melhora a qualidade; possibilitam a implantação de projetos de abastecimento à medida da necessidade (Werege, 1997; ABAS, 2016).

4 I USO E EXPLORAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A busca por água subterrânea continua sendo uma prática importante na atualidade, devido à crescente demanda de água e à necessidade de garantir a segurança hídrica.

Os habitantes continuam buscando fontes alternativas, como poços e furos profundos (Trimmer, 2000; Foster et al., 2018). A exploração de água subterrânea é condicionada a fatores quantitativos, qualitativos e econômicos (Howard, 2017; Leal, 1999), como:

- **Quantidade:** influenciada pela taxa de recarga dos aquíferos e pelas características hidráulicas dos terrenos;
- **Qualidade:** influenciada pela composição das rochas, pela presença de contaminantes e pelas condições climáticas e de renovação das águas;
- **Econômico:** depende do custo da perfuração de poços, da profundidade do aquífero, da qualidade da água e das condições de bombeamento.

O uso de águas subterrâneas é uma prática antiga e sua evolução tem acompanhado a própria evolução da humanidade. As técnicas de construção de poços e métodos de bombeamento têm sido aprimoradas ao longo do tempo, possibilitando a extração de água em volumes e profundidades cada vez maiores, atendendo às demandas de cidades, indústrias, projetos de irrigação, entre outros (Foster et al., 2018).

A relação entre a demanda e o uso varia entre os países e, dentro deles, de região para região. No entanto, em geral, o abastecimento público continua sendo a maior demanda individual por água subterrânea (PROASNE, 2003; Barlow et al., 2019).

Praticamente todos os países do mundo, desenvolvidos ou não, utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades. Países como Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, França, Holanda, Hungria, Itália, Marrocos, Rússia e Suíça atendem de 70% a 90% da demanda para o abastecimento público (Margat e Van der Gun, 2013). Outros países utilizam a água subterrânea para atender a todas as suas necessidades (como Dinamarca, Arábia Saudita e Malta) ou apenas como suplemento para o abastecimento público e atividades como irrigação, produção de energia, turismo e indústria. Na Austrália, 60% do país depende totalmente do manancial subterrâneo e em mais de 20% o seu uso é predominante. Na região metropolitana da Cidade do México, cerca de 80% da demanda dos quase 20 milhões de habitantes é atendida (Margat e Van der Gun, 2013).

De acordo com a UNESCO (2021), cerca de 2 bilhões de pessoas dependem da água subterrânea para sobreviver em todo o mundo. Regiões áridas e semiáridas, bem como algumas ilhas, têm a água subterrânea como sua única fonte hídrica disponível para uso humano. Mesmo regiões desérticas, como a Líbia, atendem à demanda de água em cidades e na irrigação por meio de poços tubulares perfurados no Saara (UNESCO, 2021).

De acordo com a FAO (2021), estima-se que foram perfurados mais de 500 milhões de poços no mundo, a maioria dos quais nos países em desenvolvimento, para fins de irrigação e abastecimento doméstico. Nos Estados Unidos, por exemplo, são perfurados cerca de 150 mil poços por ano, com uma extração de cerca de 100 bilhões de m³/ano, atendendo a mais de 40% do abastecimento público e das indústrias (USGS, 2021). Em todo o mundo, cerca de 340 bilhões de toneladas de água são retiradas anualmente na

África do Norte, China, Índia, Estados Unidos e Arábia Saudita, e não se renovam. Essa água poderia produzir comida suficiente para alimentar mais de 1 bilhão de pessoas por ano (Shah, 2016).

A busca intensa por água, sobretudo potencializada pela expansão das áreas agrícolas tem provocado o uso intenso das águas subterrâneas, além das fontes superficiais. Existem diversos exemplos no mundo de esgotamento de aquíferos por sobreexploração para uso em irrigação (Gleick, 2020). Estima-se que existam no mundo 350 milhões de hectares irrigados com água subterrânea, sendo 21 milhões desses nos Estados Unidos e 70 milhões na Índia (FAO, 2021).

No que se refere ao Brasil, vários núcleos urbanos dependem da água subterrânea como recurso principal ou complementar, incluindo indústrias, propriedades rurais, escolas, hospitais e outros estabelecimentos que utilizam água de poços profundos com frequência. O abastecimento público também é bastante dependente dessa fonte de água, e importantes cidades brasileiras, como Ribeirão Preto (SP), Mossoró e Natal (RN), Maceió (AL), Região Metropolitana de Recife (PE) e Barreiras (BA), dependem integral ou parcialmente da água subterrânea para seu abastecimento (ANA, 2022).

Portanto, a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos é essencial para garantir a segurança hídrica no país. As águas subterrâneas desempenham um papel fundamental no abastecimento de muitas cidades brasileiras, sendo que em alguns estados, como o Maranhão, São Paulo e Piauí, a dependência dessas águas chega a atingir percentuais superiores a 70% e 80%. Além de fornecer água potável, as águas subterrâneas também apresentam outras características únicas, como a presença de águas termais, que estimulam o turismo em cidades como Caldas Novas em Goiás, Araxá e Poços de Caldas em Minas Gerais. Outro uso importante das águas subterrâneas é a utilização da água mineral pelas populações dos centros urbanos devido à sua alta qualidade (ANA, 2022).

Mesmo em áreas com elevado teor salino, como nas regiões de ocorrência dos sistemas aquíferos fissurados do semiárido nordestino, as águas subterrâneas muitas vezes são a única fonte de suprimento permanente, apesar dos desafios associados ao seu uso (Oliveira et al., 2019).

Segundo o Censo do IBGE de 2010, aproximadamente 53% da população brasileira é abastecida, para fins domésticos, com água subterrânea, sendo que 5% se auto-abastece das águas de poços rasos, 10% de nascentes ou fontes e 38% de poços profundos. Portanto, o número de poços tubulares em operação no Brasil está estimado em cerca de 450.000, com um número anual de perfurações de aproximadamente 15.000, o que pode ser considerado insuficiente diante das necessidades de água potável das populações e se comparado com outros países (ANA, 2022). Os estados com maior número de poços perfurados são São Paulo (60.000), Bahia, Rio Grande do Sul, Ceará e Piauí (Oliveira et al., 2019).

A exploração de água subterrânea é realizada de várias maneiras, variando de métodos tradicionais a modernos. Tais métodos estão se desenvolvendo todos os dias através de novos meios e dispositivos. A utilização de tecnologias como a geofísica, que emprega técnicas como eletrorresistividade, sísmica de reflexão, sísmica de refração, entre outras, tem ganhado cada vez mais espaço na exploração de água subterrânea (ANA, 2022).

A exploração de água subterrânea é realizada de várias maneiras, variando de métodos tradicionais a modernos. Tais métodos estão em constante desenvolvimento através de novos meios e dispositivos. A utilização de tecnologias como a geofísica, que emprega técnicas como eletrorresistividade, sísmica de reflexão, sísmica de refração, entre outras, tem ganhado cada vez mais espaço na exploração de água subterrânea (ANA, 2022; Meijirik, 2007)

Várias técnicas podem ser utilizadas para explorar os recursos hídricos subterrâneos. A perfuração de teste e a análise estratigráfica são os métodos mais confiáveis e padrão para determinar a localização de um poço e a espessura da unidade aquífera (Sophocleous, 2018; Madan et al., 2010). No entanto, esses métodos de investigação da água subterrânea não são eficazes em termos de tempo e custo, e muitas vezes exigem habilidades específicas (Sophocleous, 2018; Roscoe, 1990; Fetter, 1994).

As técnicas de prospecção geofísica também têm sido utilizadas por vários pesquisadores para explorar os recursos hídricos subterrâneos em diferentes tipos de terreno geológico (Singh et al., 2017; Zhao et al., 2021; Ako et al., 1989; Amadi et al., 1990; Olorunfemi et al., 1995; Olayinka et al., 2001 e Adiat et al., 2009). No entanto, devido à falta de precisão de uma análise no local, os resultados e interpretações de levantamentos geofísicos sempre requerem validação com dados de furos (Ghazanfari et al., 2018; Adiat, 2009).

O uso de técnicas modernas como Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica tem fornecido meios mais eficazes, rápidos e econômicos para avaliar e gerenciar os recursos hídricos subterrâneos (Sophocleous, 2018; Singh et al., 2021; Zhao et al., 2021; Jha et al., 2007; Meijerink, 2007). Essas técnicas permitem a identificação de áreas promissoras para exploração de água subterrânea, com base na avaliação de parâmetros hidrológicos, geológicos e topográficos relevantes para a sua disponibilidade. Estudos têm sido realizados para investigar a aplicação dessas técnicas em diferentes regiões e condições geológicas (Ghazanfari et al., 2018; Jha et al., 2019).

5 | AQUÍFEROS

Um aquífero é uma formação geológica do subsolo, constituída por rochas permeáveis que armazenam água em seus poros ou fraturas. Outro conceito se refere ao aquífero como sendo somente o material geológico capaz de servir como depositório e

transmissor da água armazenada. A água subterrânea é armazenada em espaços abertos e fraturas dentro de formações geológicas abaixo da superfície da terra, conhecidos como aquíferos (Lehr et al., 2005).

Um aquífero é um leito saturado ou formação que não só armazena água, mas a produz em quantidade suficiente para ser importante como fonte de abastecimento. Assim, uma litologia só será considerada um aquífero se, além de ter seus poros saturados de água, permitir a fácil transmissão da água armazenada.

A principal propriedade de um aquífero é a sua capacidade de liberar a água retida em seus poros e sua capacidade de transmitir o fluxo facilmente (Lehr et al., 2005). Essas propriedades essencialmente dependem da composição do aquífero e incluem a porosidade, rendimento, condutividade hidráulica, permeabilidade e coeficiente de armazenamento.

Um aquífero pode ter extensão de poucos quilômetros quadrados a milhares de quilômetros quadrados, ou pode, também, apresentar espessuras de poucos metros a centenas de metros (Rebouças et al., 2002). Etimologicamente, aquífero significa: aqui = água; fero = transfere; ou do grego, suporte de água (Heinen et al., 2003).

Os aquíferos podem ser formados por rochas consolidadas ou não consolidadas (Lehr et al., 2005). As rochas consolidadas são compostas de materiais como arenito, tufo, calcário e granito, já as rochas inconsolidadas são compostas por sedimentos não compactados, como areia, argila, cascalho e outras partículas que se acumulam ao longo do tempo e formam camadas sedimentares.

Os aquíferos mais importantes do mundo, seja por extensão ou pela transnacionalidade, são: o Guaraní – Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai (1,2 milhões de km²); o Arenito Núbia - Líbia, Egito, Chade, Sudão (2,5 milhões de km²); o Sistema Aquífero Guaraní - Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai (1,2 milhões de km²); o Digitalwaterway Vechte – Alemanha, Holanda (7,5 mil km²); o Slovak Karst-Aggtelek - República Eslovaca e Hungria; o Praded – República Checa e Polônia (3,3 mil km²) (UNESCO, 2021); a Grande Bacia Artesiana (1,7 milhões km²) e a Bacia Murray (375 mil km²), ambos na Austrália. Em um levantamento mais recente, a UNESCO identificou mais de 200 aquíferos transfronteiriços em todo o mundo, incluindo mais de 100 na Europa (UNESCO, 2021).

6 | TIPOS DE AQUÍFEROS

A litologia do aquífero, ou seja, a sua constituição geológica (porosidade/permeabilidade intergranular ou de fissuras), é que irá determinar a velocidade da água em seu meio, a qualidade da água e a sua capacidade como reservatório. A litologia é resultado da sua origem geológica, que pode ser fluvial, lacustre, eólica, glacial e aluvial (rochas sedimentares), vulcânica (rochas fraturadas) e metamórfica (rochas calcárias), determinando assim os diferentes tipos de aquíferos. Quanto à porosidade, existem três tipos de aquíferos, os fissurais, porosos e cársticos. (Sophocleous, 2018; Fetter, 2001;

Freeze e Cherry, 1979; Todd e Mays, 2005; Domenico e Schwartz, 1997; Bear e Cheng, 2010). (Figura 3)

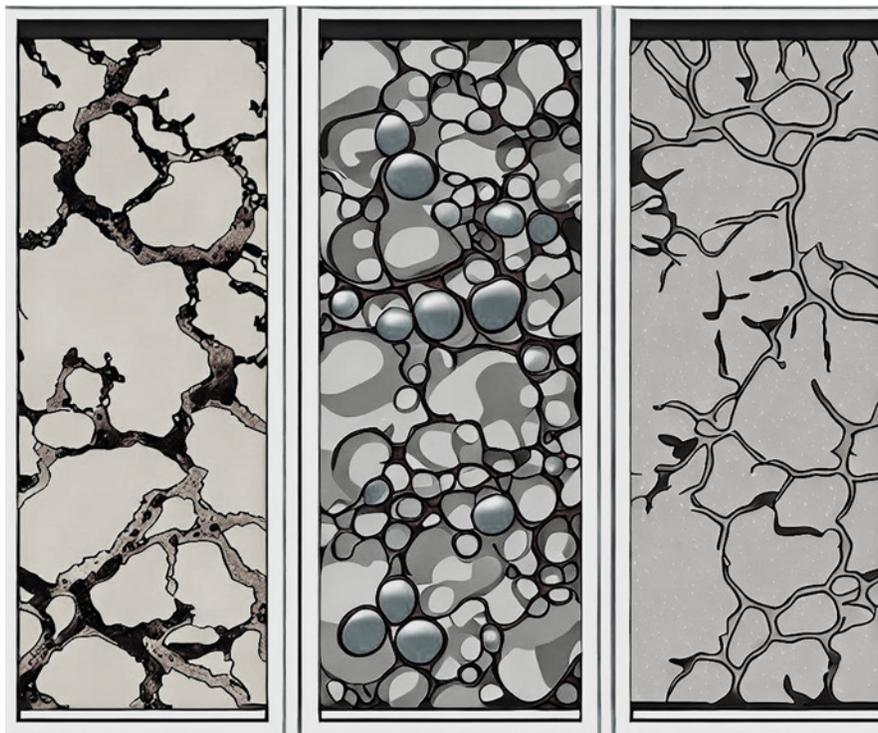


Figura 3- Tipos de Aquíferos quanto à porosidade.

Fonte: O Autor.

- **Aquífero poroso ou sedimentar** – é aquele formado por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água se dá nos poros formados entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada. Constituem os mais importantes aquíferos, pelo grande volume de água que armazenam e por sua ocorrência em grandes áreas. Esses aquíferos ocorrem nas bacias sedimentares e em todas as várzeas onde se acumularam sedimentos arenosos. Uma particularidade desse tipo de aquífero é sua porosidade quase sempre homoganeamente distribuída, permitindo que a água flua em qualquer direção, em função somente dos diferenciais de pressão hidrostática ali existentes. Essa propriedade é conhecida como isotropia. (Fetter, 2001; Freeze e Cherry, 1979; Todd e Mays, 2005; Domenico e Schwartz, 1997; Bear e Cheng, 2010)
- **Aquífero fraturado ou fissural** – é formado por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, duras e maciças, onde a circulação da água se dá nas fraturas, fendas e falhas abertas devido ao movimento tectônico. Ex.: basalto, granitos, gabros, filões de quartzo, etc. (SMA, 2003). A capacidade dessas rochas de

acumularem água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a infiltração e fluxo da água. Poços perfurados nessas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora, sendo que a possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá somente de interceptar fraturas capazes de conduzir a água. Nesses aquíferos, a água só pode fluir onde houver fraturas, que, quase sempre, tendem a ter orientações preferenciais. São ditos, portanto, aquíferos anisotrópicos. Um caso particular de aquífero fraturado é representado pelos derrames de rochas vulcânicas basálticas das grandes bacias sedimentares brasileiras. (Melo et. al. 2017; Frost e Zaghoul 2013)

- **Aquífero cárstico (Karst)** – é formado em rochas calcárias ou carbonáticas, onde a circulação da água se dá nas fraturas e outras discontinuidades (diaclasses) que resultaram da dissolução do carbonato pela água. Essas aberturas podem atingir grandes dimensões, criando verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras e com fluxo em canais. As rochas são os calcários, dolomitos e mármore. (Doerfliger et. al. 2007, Ford e Williams 2007)

Os aquíferos também podem ser classificados quanto à superfície superior, segundo a pressão da água (Figura 4), podendo ser classificado em aquífero livre, confinado e semiconfinados.

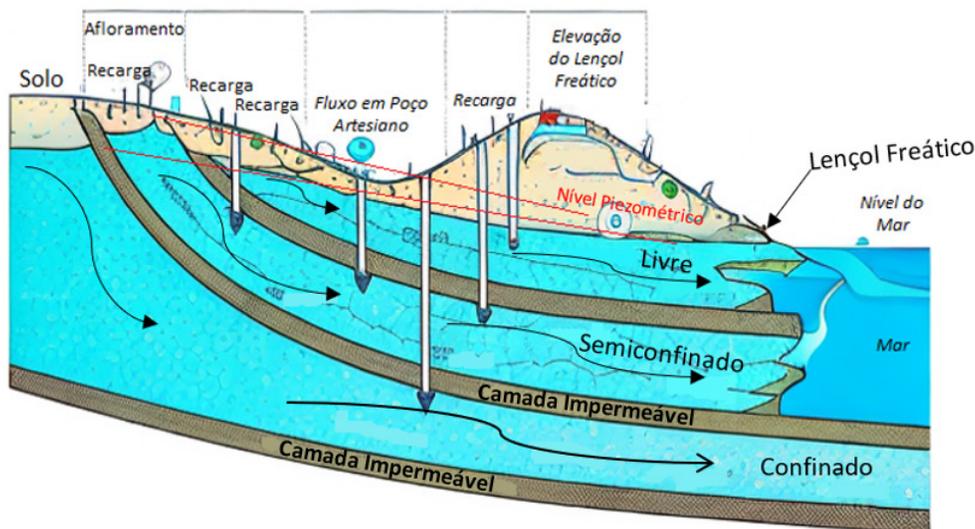


Figura 4- Tipos de Aquífero quanto a pressão.

Fonte: O autor.

- **Aquífero livre:** constituído por uma formação geológica permeável e superficial, totalmente exposta em toda a sua extensão e limitada na base por uma camada impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica e a recarga ocorre diretamente pela chuva. Em um poço de aquífero livre, o nível da água varia de acordo com a quantidade de chuva e é conhecido como nível freático. É o aquífero mais comum e explorado, mas também é vulnerável à contaminação. (Amaral, 2012; Makridakis e Dianat, 2020)
- **Aquífero confinado:** constituído por uma formação geológica permeável, confinado entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica, fazendo com que a água suba no poço acima do nível do aquífero. A recarga indireta ocorre preferencialmente nos locais onde a formação aflora à superfície. Em um poço de aquífero confinado, a água sobe acima do teto do aquífero devido à pressão exercida pelas camadas confinantes sobrejacentes. A altura que a água sobe é conhecida como nível potenciométrico, e o poço é artesianos. (Makridakis e Dianat, 2020; Fetter, 2001)
- **Aquífero semi-confinado:** limitado na base, no topo ou em ambos, por camadas cuja permeabilidade é menor do que a do aquífero em si. O fluxo preferencial da água se dá ao longo da camada do aquífero. A recarga pode ocorrer de forma secundária através das camadas semi-confinantes, desde que haja uma diferença de pressão hidrostática entre a camada do aquífero e as camadas subjacentes ou sobrejacentes. Em certas circunstâncias, um aquífero livre pode ser abastecido por água oriunda de camadas semi-confinadas subjacentes, ou vice-versa. Zonas de fraturas ou falhas geológicas podem constituir pontos de fuga ou recarga da água da camada confinada. (Makridakis e Dianat, 2020; Fetter, 2001)

7 | ÁREAS DE REABASTECIMENTO E DESCARGA DOS AQUÍFEROS

Um aquífero apresenta uma reserva permanente de água e uma reserva ativa ou reguladora que são continuamente abastecidas através da infiltração da chuva e de outras fontes subterrâneas. As reservas reguladoras ou ativas correspondem ao escoamento de base dos rios.

A área por onde ocorre o abastecimento do aquífero é chamada zona de recarga, que pode ser direta ou indireta. O escoamento de parte da água do aquífero ocorre na zona de descarga (ANA, 2001).

- **Zona de recarga direta:** é aquela onde as águas das chuvas infiltram-se diretamente no aquífero, através de suas áreas de afloramento e fissuras de rochas sobrejacentes. Sendo assim, a recarga sempre é direta nos aquíferos livres, ocorrendo em toda a superfície acima do lençol freático. Nos aquíferos confinados, o reabastecimento ocorre preferencialmente nos locais onde a

formação portadora de água aflora à superfície (Dill et. al., 2012; Braga et. al. 2011).

- **Zona de recarga indireta:** são aquelas onde o reabastecimento do aquífero se dá a partir da drenagem (filtração vertical) superficial das águas e do fluxo subterrâneo indireto, ao longo do pacote confinante sobrejacente, nas áreas onde a carga potenciométrica favorece os fluxos descendentes (Dill et. al., 2012; Braga et. al. 2011).
- **Zona de descarga:** é aquela por onde as águas emergem do sistema, alimentando rios e jorrando com pressão por furos (Dill et. al., 2012; Braga et. al. 2011).

As maiores taxas de recarga ocorrem em regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres. Em regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada (Rebouças et al., 2002).

Sob condições naturais, apenas uma parcela dessas reservas reguladoras é passível de exploração, constituindo o potencial ou reserva explorável. Em geral, esta parcela é calculada entre 25% e 50% das reservas reguladoras (ANA, 2001). Esse volume de exploração pode aumentar em função das condições de ocorrência e recarga, bem como dos meios técnicos e financeiros disponíveis, considerando que a soma das extrações com as descargas naturais do aquífero para rios e oceano não pode ser superior à recarga natural do aquífero.

8 | FUNÇÕES DOS AQUÍFEROS

Além de suprir água suficiente para manter os cursos de água superficiais estáveis (função de produção), os aquíferos também ajudam a evitar seu transbordamento, absorvendo o excesso de água da chuva intensa (função de regularização). Na Ásia tropical, onde a estação quente pode durar até 9 meses e as chuvas de monção podem ser bastante intensas, esse duplo serviço hidrológico é crucial (SAMPAT, 2001). Segundo o mesmo autor, os aquíferos também proporcionam uma forma de armazenar água doce sem muita perda pela evaporação - outro serviço particularmente valioso em regiões quentes, propensas à seca, onde essas perdas podem ser extremamente altas.

Na África, por exemplo, em média, um terço da água extraída de reservatórios todo ano é perdido pela evaporação. Os pântanos, habitats importantes para aves, peixes e outras formas de vida silvestre, nutrem-se normalmente de água subterrânea, onde o lençol freático aflora à superfície em ritmo constante. Onde há muita exaustão de água subterrânea, o resultado é frequentemente leitos secos de rios e pântanos ressecados. (Lovell, 2017; Said e Thompson, 2011)

Portanto, os aquíferos podem cumprir as seguintes funções (Rebouças et al., 2002):

- **Função de produção:** corresponde à sua função mais tradicional de produção de água para o consumo humano, industrial ou irrigação.
- **Função de estocagem e regularização:** utilização do aquífero para estocar excedentes de água que ocorrem durante as enchentes dos rios, correspondentes à capacidade máxima das estações de tratamento durante os períodos de demanda baixa, ou referentes ao reuso de efluentes domésticos e/ou industriais.
- **Função de filtro:** corresponde à utilização da capacidade filtrante e de depuração bio-geoquímica do maciço natural permeável. Para isso, são implantados poços a distâncias adequadas de rios perenes, lagoas, lagos ou reservatórios, para extrair água naturalmente clarificada e purificada, reduzindo substancialmente os custos dos processos convencionais de tratamento.
- **Função ambiental:** consiste em sua capacidade de manter a qualidade da água subterrânea, protegendo-a de contaminação e poluição. Além disso, os aquíferos desempenham um papel importante no equilíbrio do ecossistema local, fornecendo água para pântanos, riachos e rios, que por sua vez sustentam a biodiversidade de animais e plantas.
- **Função transporte:** o aquífero é utilizado como um sistema de transporte de água entre zonas de recarga artificial ou natural e áreas de extração excessiva.
- **Função estratégica:** a água contida em um aquífero foi acumulada durante muitos anos ou até séculos e é uma reserva estratégica para épocas de pouca ou nenhuma chuva.

9 | OCORRÊNCIAS DE AQUÍFEROS NO BRASIL

A combinação das estruturas geológicas com os fatores geomorfológicos e climáticos do Brasil resultou na configuração de 10 províncias hidrogeológicas (Figura 5), que são regiões com sistemas aquíferos com condições semelhantes de armazenamento, circulação e qualidade da água (MMA, 2003). Essas províncias podem ser divididas em subprovíncias.



Figura 5 - Províncias Hidrogeológicas.

Fonte: Adaptado de Pessoa et. al 1980.

Conforme Feitosa et al., 2008, uma Província Hidrogeológica é uma região com características gerais semelhantes em relação às principais ocorrências de águas subterrâneas. Segundo Feitosa et al. (2008), os fatores fundamentais para definir uma Província Hidrogeológica são os aspectos geológicos (litologia, estrutura e tectônica) e fisiográficos (clima, morfologia, hidrografia, solos e vegetação). É importante ressaltar, no entanto, que uma Província Hidrogeológica pode ser modificada ou subdividida ao longo do tempo.

Sendo assim, as águas subterrâneas no Brasil ocupam diferentes tipos de reservatórios, desde as zonas fraturadas do embasamento cristalino (escudo) até os depósitos sedimentares cenozoicos (bacias sedimentares), sendo classificadas em três sistemas aquíferos: porosos, fissurados e cársticos, conforme a Tabela 1 (Leal, 1999).

Províncias Hidrogeológicas	Domínios Aquíferos	Sistema Aquífero Principal	Área (Km ²)	Volume de Água (Km ³)	Total (%)
Escudo Oriental	Substratos Aflorantes	Zonas Fraturadas	600000	80	0,07
Escudos Setentrional, Central e Meridional	Substratos Aflorantes	Manto Rochas Fraturadas e/ou Alteradas	4000000	10000	8,90
Amazonas	Bacia Sedimentar Amazonas	Arenitos Barreiras e Alter do Chão	1300000	32500	28,94
Parnaíba	Bacia Sedimentar Maranhão	Arenitos Itapecuru, Cordas Grajaú, Motuca, Poti-Piauí, Cabeças, Serra Grande	700000	17500	15,58
Parnaíba	Bacia Sedimentar São Luis-Barrerinhas	Arenitos São Luis e Itapecuru	50000	250	0,22
Costeira	Bacia Sedimentar Potiguar Recife	Arenitos Barreiras, Açú- Beberibe, Calcário Jandaia	2300	260	0,20
Costeira	Bacia Sedimentar Sergipe -Alagoas	Arenitos Barreiras e Marituba	10000	100	0,9
Costeira	Bacia Sedimentar Jatobá, Tucano-Recôncavo	Arenitos Marizal, Tacaratú, São Sebastião	5600	840	0,75
Paraná	Bacia Sedimentar Paraná	Arenitos Baurú-Caiuá, Furnas/ Aquidauana, Guarani, Rio Branco, Bassaltos Serra Geral	100000	50400	44,88
	Depósitos Diversos	Aluviões e Dunas	77300	411	0,37

Tabela 1- Províncias Hidrogeológicas e Sistemas Aquíferos (MMA 2023).

Os escudos são compostos por rochas magmáticas e metamórficas e representam os primeiros núcleos de rochas emergidas que surgiram durante a formação inicial da crosta terrestre. Por outro lado, as bacias sedimentares são depressões que, ao longo do tempo, foram preenchidas por detritos ou sedimentos provenientes de áreas próximas ou distantes, geralmente dispostas de forma horizontal (Coelho, 1996).

As Províncias são classificadas em domínios hidrogeológicos, os quais são definidos como “representativos de um conjunto de unidades geológicas com similaridades hidrogeológicas, baseando-se principalmente nas características litológicas das rochas”

(Feitosa et al., 2008). Esse conceito foi desenvolvido durante a elaboração do Mapa de Domínios Hidrogeológicos da Bahia, que ainda não foi publicado (Bomfim, 2010).

O Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil (Figura 6), elaborado pela CPRM (Bomfim e Jesus, 2007), utilizando o Sistema de Informações Geográficas (SIG), de acordo com a definição mencionada anteriormente, estabelece sete domínios hidrogeológicos:

- **Formações Cenozoicas:** aquífero poroso;
- **Bacias Sedimentares:** aquífero poroso;
- **Poroso/Fissural:** aquífero misto;
- **Metassedimentos/Metavulcânicas:** aquífero fissural;
- **Vulcânicas:** aquífero fissural;
- **Cristalino:** aquífero fissural;
- **Carbonatos/Metacarbonatos:** aquífero fissural.

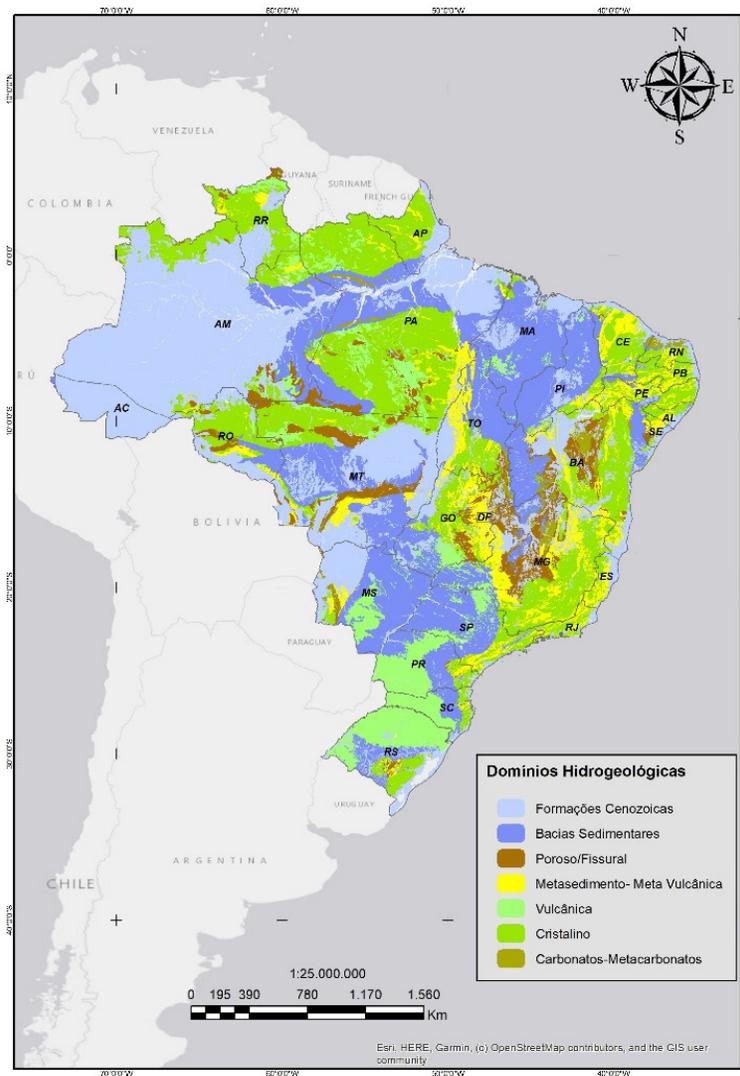


Figura 6- Domínios Hidrogeológicos.

Fonte : Adaptado Bonfin e Jesus 2007.

Os domínios hidrogeológicos no Brasil abrangem uma ampla variedade de sistemas hidrogeológicos, cada um com suas características distintas. Esses sistemas podem ser classificados com base em suas propriedades hidráulicas, geológicas e geográficas, sendo essencial compreender sua natureza para uma gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos.

Um dos sistemas hidrogeológicos dominantes no país são os aquíferos porosos, formados por rochas sedimentares que ocupam cerca de 42% da área total (3,6 milhões de

Km²). Esses aquíferos estão distribuídos em cinco províncias hidrogeológicas: Amazonas, Paraná, Parnaíba-Maranhão, Centro-Oeste e Costeira. Sua estrutura geológica, com camadas permeáveis e impermeáveis alternadas, confere-lhes condições de artesianismo. Destacam-se as Bacias do Paraná, Amazonas, Parnaíba e a Subprovíncia Potiguar-Recife, devido à sua extensão e potencialidade. (ABAS, 2003)

Outro sistema hidrogeológico presente no país é o dos aquíferos fissurados ou fraturados, que abrangem cerca de 53,8% do território nacional. Esses aquíferos estão nas Províncias Hidrogeológicas dos Escudos Setentrional, Central, Oriental e Meridional. As duas primeiras províncias, com rochas fraturadas do embasamento, possuem boas possibilidades hídricas devido aos altos índices pluviométricos. A Província Oriental está dividida em duas subprovíncias: Nordeste e Sudeste. Já a Província Meridional, localizada em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul, apresenta substrato alterado. Os rios perenes e os aquíferos dessa região são recarregados pelos altos índices pluviométricos locais. (MMA,2003).

As duas primeiras províncias com rochas fraturadas do embasamento apresentam razoáveis possibilidades hídricas, devido aos altos índices pluviométricos da área. A Província Oriental está dividida em duas subprovíncias (Nordeste e Sudeste).

A Província Meridional, em Santa Catarina e no Rio Grande do Sul é de substrato alterado. Os altos índices pluviométricos da região asseguram a perenização dos rios e contribuem para a recarga dos aquíferos, cujas reservas são, em parte, restituídas à rede hidrográfica (MMA,2003).

Esse sistema apresenta reservas de águas subterrâneas da ordem de 10.080 km³ (Teixeira et. al. 2020; Bittencourt e Savio, 2020; Leal, 1999). As águas são de boa qualidade química, podendo ocorrer localmente teores de ferro acima do permitido. No domínio do embasamento cristalino subaflorente, como na Província Hidrogeológica Escudo Oriental do Nordeste onde está localizada a região semiárida – há pequena disponibilidade hídrica, devido à formação de rochas cristalinas (Lima e Conicelli, 2020). É frequente observar teor elevado de sais nas águas dessa região, o que restringe ou impossibilita seu uso (MMA, 2003). Nesse domínio subaflorente é que nascem os rios temporários.

Além disso, temos os sistemas hidrogeológicos cársticos, compostos pelo sistema cárstico-fissural da Província Hidrogeológica do São Francisco e pela Formação Jandaíra. Inclui-se também os domínios do calcário do Grupo Bambuí com mais de 350.000 km², distribuído nos Estados da Bahia, Goiás e Minas Gerais, e a Formação Caatinga. As profundidades de desenvolvimento cárstico variam, com média em torno de 150 metros. O Grupo Bambuí apresenta vazões superiores a 200 metros cúbicos por hora, enquanto a Formação Jandaíra possui vazões mais baixas, geralmente inferiores a 3,5 m³/h. Outros aquíferos cársticos relevantes são o Pirabas, com profundidade média de 220 metros e vazão de 135 m³/h, e a Formação Capiru do Grupo Açungui, com vazão média de 180 m³/h e profundidade média de 60 m. (Carmo e Costa, 2021; Lisboa e Simões, 2021; MMA,2003).

A classificação e compreensão desses sistemas hidrogeológicos são fundamentais para uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Os sistemas aquíferos brasileiros abrigam reservatórios significativos de água (Figura 7), que alimentam uma das redes de rios perenes mais extensas do mundo, com exceção dos rios temporários que se originam nas regiões semiáridas do Nordeste, onde afloram as rochas do embasamento geológico (Rebouças et al., 2002). Além disso, esses sistemas desempenham um papel socioeconômico importante devido ao seu potencial hídrico (MMA, 2003).

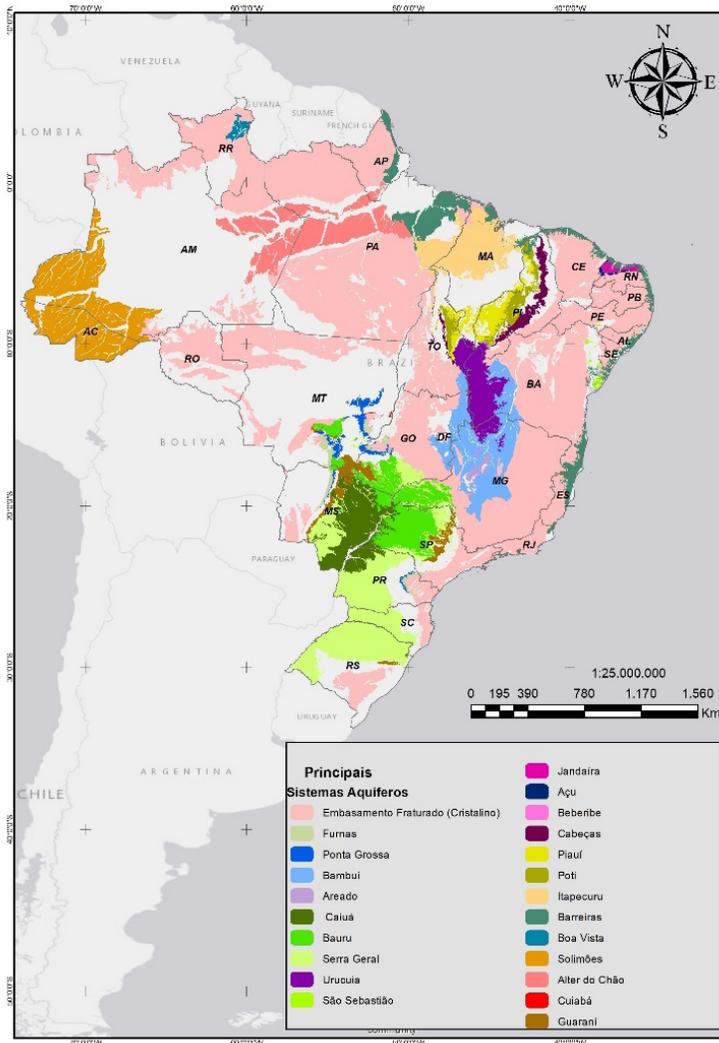


Figura 7- Principais Sistemas Aquíferos do Brasil.

Fonte: Adaptado MMA.

Os sistemas aquíferos no Brasil são abundantes e desempenham um papel crucial no abastecimento de água e no equilíbrio hidrológico do país. A seguir, apresento os principais aquíferos por regiões:

Região Norte: Aquífero Alter do Chão: Localizado na Bacia Amazônica, abrange uma área de aproximadamente 437.000 km² com uma vazão aproximada de 86 mil km³, possuindo grande importância na região, fornecendo água para diversos rios perenes. (Sousa et al. 2020)

Região Nordeste: O aquífero Urucuia Estende-se pelos estados de Piauí, Ceará, Bahia e Minas Gerais, sendo um dos principais aquíferos da região Nordeste. Possui grande potencial hídrico, contribuindo para o abastecimento de água de várias cidades. Com extensão de aproximadamente 142 mil km², e vazão de 420 m³/s. (Gonçalves et. al 2016)

O aquífero Jandaíra, localizado no Rio Grande do Norte e em parte da Paraíba e do Ceará, é um importante aquífero cárstico-fissural, responsável pelo abastecimento de água de diversas comunidades da região. Ocorre numa superfície total de 17.756 km²— esta área de ocorrência inclui as zonas recobertas pela Formação Barreiras, aluviões e dunas, que totalizam cerca de 5.980 km². Estudos regionais indicam que a espessura da Formação Jandaíra pode chegar a 600 m na porção mais profunda da Bacia Potiguar, embora as espessuras mais importantes, do ponto de vista hidrogeológico, tenham sido registradas entre 50 e 150 m com vazões variando entre 10 a 50 m³ h⁻¹ conforme Vasconcelos et.al 2010.

Região Centro-Oeste: O aquífero Guarani, considerado um dos maiores sistemas aquíferos do mundo, estende-se por partes dos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e São Paulo, além de abranger áreas do Paraguai, Argentina e Uruguai. É uma fonte estratégica de água doce, utilizada para abastecimento público, agricultura e indústria. A maior parte (70 por cento ou 840 000 km²) da área ocupada pelo aquífero — cerca de 1 200 000 km² — está no subsolo do centro-sudoeste do Brasil. O restante se distribui entre o nordeste da Argentina (255 000 km²), noroeste do Uruguai (58 500 km²) e sudeste do Paraguai (58 500 km²), nas bacias do rio Paraná e do Chaco-Paraná. A vazão é muito variável. Por exemplo: é de mais de 200 000 litros por hora na região do Alto Rio Uruguai, no Rio Grande do Sul, mas possui raros poços acima de 5 000 litros por hora na região das Missões, no mesmo estado. Em outros estados, já foram registradas vazões da ordem de 800 000 litros por hora. (Borges et. al 2013; Borges et. al. 2020)

Região Sudeste: O Aquífero Bauru, localizado principalmente no estado de São Paulo, abrange uma área significativa no Centro-Oeste. É uma importante reserva de água subterrânea utilizada para múltiplos fins, como abastecimento urbano e irrigação. Ocupa uma área de com área total de 370.000 km², as camadas de sedimentação intermediária e de topo mostram vazão variável entre 3,0 e 20 m³/h, enquanto porções mais restritas na base do pacote sedimentar exibem vazões entre 20 e 50 m³/h. De modo geral, a média da vazão de produção dos poços é de 8 m³ /h (DAEE, 2005; Birsa et. al. 2019).

O aquífero Tubarão: Situado no estado de São Paulo, é um aquífero sedimentar que desempenha um papel fundamental no abastecimento de água para a região. Seus poços normalmente apresentam baixa produtividade, com fluxos inferiores a 2,8 litros/segundo. Contudo, em alguns pontos é possível atingir vazões de até 11 litros/segundo, com uma área de 20.000 Km² (CETESB,2010; Silva et. al. 2020).

Região Sul: O aquífero Serra Geral, estende-se pelos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina. É um importante aquífero fissural que fornece água para várias cidades e atividades agrícolas na região. Os basaltos fissurados afloram numa extensão de cerca de 20.000 km², localizado em camadas inferiores aos sedimentos do Grupo Bauru. Sua espessura varia desde poucos metros, aumentando para Oeste, até 1.000 metros. Assim sendo, suas características hidrodinâmicas ficam melhor demonstradas pelos valores de vazão específica que variam entre 0,08 e 50 m³/h/m., com valor médio de 1,0 m³ /h/m (Fernandes et al. 2006, Gonçalves et. al. 2020).

Os sistemas aquíferos no Brasil desempenham um papel fundamental na disponibilidade de água doce e no funcionamento dos rios perenes em diversas regiões do país. Eles abrigam reservatórios significativos de água e contribuem para o desenvolvimento socioeconômico, fornecendo recursos hídricos para atividades agrícolas, industriais e domésticas. Além disso, a compreensão dos diferentes sistemas aquíferos e suas características, como extensão, vazão e potencialidade, é essencial para o manejo sustentável dos recursos hídricos subterrâneos. A preservação e conservação desses sistemas são de suma importância para garantir a disponibilidade de água de qualidade no presente e para as gerações futuras.

10 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao considerarmos todas as informações discutidas sobre águas subterrâneas, podemos concluir que elas desempenham um papel crucial no abastecimento de água doce, tanto para as necessidades humanas quanto para a manutenção dos ecossistemas. A ocorrência e o volume das águas subterrâneas são influenciados por fatores geológicos, climáticos e hidrológicos, e seu uso sustentável requer uma compreensão detalhada de suas características e comportamento.

A exploração de águas subterrâneas é uma prática comum em muitas regiões, proporcionando uma fonte confiável de água para consumo humano, agricultura e indústria. No entanto, é essencial que essa exploração seja feita de forma responsável, considerando a recarga natural dos aquíferos e evitando o esgotamento excessivo dos recursos hídricos.

A qualidade das águas subterrâneas é de extrema importância, pois elas podem ser vulneráveis à contaminação por atividades humanas e processos naturais. Portanto, é fundamental adotar medidas de proteção e monitoramento para preservar a qualidade desses recursos vitais.

Existem diferentes tipos de aquíferos no Brasil, como aquíferos porosos, fissurados e cársticos, cada um com suas características hidrodinâmicas específicas. Além disso, é essencial destacar as áreas de reabastecimento e descarga dos aquíferos, que influenciam o fluxo e a disponibilidade das águas subterrâneas.

Os aquíferos desempenham funções essenciais na regulação do ciclo hidrológico, armazenando e liberando água conforme necessário. Eles contribuem para a manutenção dos rios perenes, atuam como reservatórios estratégicos e têm um papel fundamental na sustentabilidade hídrica.

No Brasil, há ocorrências significativas de aquíferos, como o Aquífero Guarani, o Aquífero Alter do Chão, o Aquífero Urucuia, entre outros. Esses aquíferos fornecem água para múltiplos usos, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico das regiões onde estão localizados.

Em suma, a compreensão dos aspectos relacionados às águas subterrâneas, incluindo sua ocorrência, volume, exploração, qualidade, tipos de aquíferos, áreas de reabastecimento e descarga, funções e ocorrências no Brasil, é fundamental para uma gestão adequada e sustentável desses recursos preciosos, garantindo seu uso consciente e a preservação desses importantes ecossistemas.

REFERÊNCIAS

ABAS- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Conheça as bacias e províncias hidrogeológicas do Brasil**. 2003.

ABAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Estatuto Social**. Brasília: ABAS, 2016.

ADIAT, K. A. N.; OLAYANJU, G. M.; OMOYI, G. O.; AKO, B. D. **Electromagnetic profiling and electrical resistivity soundings in groundwater investigation of a typical Basement Complex-a case study of Oda Town Southwestern Nigeria**. *Ozean Journal of Applied Sciences*, v. 2, n. 4, p. 333-359, 2009.

AKO, B. D.; OLORUNFEMI, M. O. **Geoelectric survey for groundwater in the Newer Basalts of Vom, Plateau State**. *Journal of Mining and Geology*, v. 25, p. 247-250, 1989.

ALBUQUERQUE, A. M. et al. **Avaliação da qualidade microbiológica de águas subterrâneas em áreas urbanas**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 4, p. 801-812, 2020.

AMADI, U. M. P., NURUDEEN, S. I. **Electromagnetic survey and the search for groundwater in the crystalline basement complex of Nigeria**. *Journal of Mining Geology*, 26(1), 45-53, 1990.

AMARAL, L. S. **Aquíferos Livres**. In: ROCHA, M. A.; AMARAL, L. S.; SANTOS, R. A. *Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2012. p. 85-96.

ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil - Abastecimento Urbano de Água**. Brasília, 2021.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021**. Brasília: ANA, 2022.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Mapa Esquemático do Sistema Aquífero Guarani**. Elaborado pela CAS/SRH/MMA (Coordenação de Águas Subterrâneas/Secretaria de Recursos Hídricos/ Ministério de Meio Ambiente) (UNPP - Unidade Nacional de Preparação do Projeto/Brasil). Escala 1:13.600.000. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2001.

BARLOW, P. M.; MAHY, M. T.; NIELSEN, D. M. **Groundwater in a Global Context**. In: ROBERTS, J. A.; MAHY, M. T. (Ed.). *Water and Society: An Introduction to the Social and Cultural Functions of Water*. London: Routledge, 2019.

BEAR, J.; CHENG, A. H.-D. **Modelagem de Fluxo e Transporte em Meios Porosos**. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

BIRSA, A. C., MARQUES, E. A., SOUSA, W. A., STEVAUX, J. C. **Hidrogeologia do Sistema Aquífero Bauru no Estado do Mato Grosso do Sul**. *Revista Brasileira de Geociências*, 49(2), 181-195, 2019.

BITTENCOURT, M. A. L., SÁVIO, M. F. **Hidrogeologia no Brasil: atualidades e perspectivas**. *Revista Brasileira de Geociências*, 50(3), e2019082; 2020.

BOMFIM L.F.C. **Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil em Ambiente SIG: Concepção e Metodologia**. In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Luís, MA, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. Anais... p. 1-18, 2010.

BOMFIM L.F.C., JESUS J.D.A. (coords.). 2007. **Mapa de Domínios/Subdomínios Hidrogeológicos do Brasil, escala 1:2.500.000 (SIG)**. Brasília, DF, CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

BORGES, M. C., ASSIS, J. C. C., MENDONÇA, R. R. **Aquífero Guarani: Características Hidrogeológicas e Importância Estratégica**. *Geociências*, 32(1), 73-86, 2013.

BORGES, R. B., BARRETO, C. F., LIMA, A. M. P., ROISENBERG, A. **Water Management in the Guarani Aquifer System: Challenges and Perspectives for Integrated Governance**. *Water*, 12(5), 1347.2020.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do MERCOSUL**. Curitiba: Imprensa Oficial, 2004.

BRAGA, B.; TOLEDO, M. C.; BRAGA, F. B. S. **Águas Subterrâneas: Recursos, Avaliação, Proteção e Planejamento**. 3. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011.

CARMO, F. F., SILVA, M. R., & COSTA, A. S. **Hidrogeologia cárstica e vulnerabilidade dos aquíferos na região do Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil**. *Revista Brasileira de Geociências*, 51(1), e2020060. 2021.

CEPIS (Centro Pan-Americano de Engenharia Sanitária e Ciências do Ambiente). **Capítulo I: a água para o século XXI no mundo e em nossa região, 2000**. Disponível em: <http://www.cepis.org.pe/eswww/dias/diainter/anos/2000/diapor.pdf>. Acesso em: 21 Fev. 2022.

COELHO, M. A. **Geografia do Brasil**. São Paulo: Moderna, 400 p. 1996.

DAEE. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Síntese dos Planos de Bacia - Plano Estadual de Recursos Hídricos, 2004-2007**. São Paulo: DAEE/Consórcio JMR-ENGEORP (Relatório nº 1/2005). **2005**.

DILL, D. M.; FETTER, C. W. **Processos e Fenômenos Hidrogeológicos**. In: ROCHA, M. A.; AMARAL, L. S.; SANTOS, R. A. *Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, **2012**. p. 29-58.

DOERFLIGER, N.; HÖTZL, H. **Karst Aquifers - Characterization and Engineering**. Berlin: Springer-Verlag, **2007**.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. **Physical and Chemical Hydrogeology**. New York: John Wiley & Sons, **1997**.

FAO (Food and Agriculture Organization). **AQUASTAT - Sistema de Informação sobre Agricultura e Água, 2021**. Disponível em : <http://www.fao.org/aquastat/en/>. Acessado em 15 de janeiro de 2023.

Feitosa F.A.C., Filho J.M., Feitosa E.C., Demetrio J.G.A. (coords.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3ª ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro, CPRM: LABHID. 812p.**2008**.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, **2001**.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**, 4th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 543–591. **1994**.

FERNANDES, A.C., PADILHA, A.L., BROSSARD, R.A., GARCIA, M.G.M.**Hidrogeologia regional do Aquífero Serra Geral no Estado de Santa Catarina**. Revista Brasileira de Geociências, 36(3), 414-426, **2006**.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. Chichester: John Wiley & Sons, **2007**.

FOSTER, S.; LOPEZ-GUNDA, J.; MACDONALD, A.; BOSCH, J. **The Importance of Groundwater in Integrated Water Resources Management**. UNESCO, **2018**.

FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall Inc., 604p.**1979**

FROST, E.; ZAGHLOUL, M. **Fractured Rock Hydrogeology**. CRC Press, **2013**.

GHAZANFARI, A., POURGHASEMI, H. R., MOHAMMADY, M., PRADHAN, B. **A comparative assessment of GIS-based random forest, bagging, boosting, classification and regression tree (CART), and maximum likelihood algorithms for groundwater potential mapping**. Environmental Earth Sciences, **2018**, 77(4), 142.

GLEICK, P. H. **Water, food, and population**. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, v. 62, n. 4, p. 2-14, **2020**.

GONÇALVES R.D., ENGELBRECHT B.Z., CHANG H.K, **Análise hidrológica de séries históricas da bacia do Rio Grande (BA): contribuição do Sistema Aquífero Urucuaia** in *Águas Subterrâneas* 30(2):190-208; **2016**.

GONÇALVES, L. R. B., VIEIRA, L. C., DA SILVA, A. R. **Hidrogeologia do Sistema Aquífero Serra Geral no município de Ponta Grossa-PR**. Revista de Geociências do Nordeste, 1(1), 19-28, 2020.

HANASAKI, N., KANAMORI, Y., YAMANAKA, Y., MAEDA, S., TOKUMITSU, R., TAKATA, Y., KUWANO-YOSHIDA, A., SATO, T., KUMAGAI, T., KIGUCHI, M., TAKAHASHI, K. **A spatially explicit representation of groundwater dynamics: model development and application over global grids**. Hydrology and Earth System Sciences, v. 24, n. 8, p. 4093-4110, 2020.

HEINEN, C.; BRINCKMANN, W. E.; BRINCKMANN, C.A. **Aquífero Guarani**. Santa Cruz do Sul: Núcleo de Pesquisa e Extensão em Gerenciamento de Recursos Hídricos da Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Boletim Informativo, v. 4, n. 2, fev. 2003.

HOWARD, K. W. F. **Groundwater in the Environment: An Introduction**. 3rd ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2017.

IGM (Instituto Geológico e Mineiro). **Água subterrânea: conhecer para preservar o futuro**. Portugal: Instituto Geológico e Mineiro, 2001.

JHA, M.K.; CHOWDHURY, A.; CHOWDARY, V.M.; PEIFFER, S. **Groundwater management and development by integrated remote sensing and geographic information systems: prospects and constraints**. Water Resour. Manag., v.21, n.2, p.427–467, 2007.

LEAL, A. S. **As águas subterrâneas no Brasil: ocorrências, disponibilidades e usos**. In: FREITAS, Marcos Aurélio Vasconcelos de (Org.). O Estado das Águas no Brasil. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas; Ministério do Meio Ambiente; Secretaria de Recursos Hídricos; Ministério de Minas e Energia, 1999. p. 334.

LEHR, J. H.; KEELEY, J. W.; LEHR, K. K.; KINGERY, T. B. **Water Encyclopedia**. New York: Wiley, 2005.

LIMA, E. C., SANTOS, J. A., CONICELLI, B. **Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade do aquífero cristalino na área de influência do AHE Sinop (MT)**. Revista Brasileira de Geociências, 50(3),2020.

LISBOA, F. L., SIMÕES, J. C. **Caracterização hidrogeológica de uma área cárstica no noroeste do Estado da Bahia, Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, 51(1), 2021.

LOVELL, H. **Global Environmental Issues**. 2nd ed. New York: Routledge, 2017.

MADAN, K. J.; CHOWDARY, V. M.; CHOWDHURY, A. **Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques**. Hydrogeology Journal, v. 18, n. 7, p. 1713-1728, 2010.

MAKRIDAKIS, S.; DIANAT, S. **Groundwater Resources Evaluation: Present and Future Uses and Environmental Concerns**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

MARGAT, J.; VAN DE GUN, J. **Groundwater around the world**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.

MEIJERINK, A. M. J. **Remote sensing applications to groundwater IHP-VI**, Series on Groundwater No. 16, UNESCO, Paris, 2007.

- MELO, D. D. et al. **Aquíferos Fraturados no Brasil**. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis: ABRH, 2017. p. 1-8.
- MMA- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Águas Subterrâneas no Brasil**. Brasília, 2021.
- MMA- Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Plano Nacional de Recursos Hídricos: documento base de referência: minuta: revisão**. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Recursos Hídricos; 2003.
- OLAYINKA, A. I.; OLAYIWOLA, M. A. **Integrated use of geoelectrical imaging and hydrochemical methods in delineating limits of polluted surface and groundwater at a landfill site in Ibadan area, southwestern Nigeria**. Journal of Mining and Geology, v. 37, n. 1, p. 53-68, 2001.
- OLIVEIRA, R. A. S.; SILVA, J. P. M.; SANTOS, M. S. **Desafios e Importância das Águas Subterrâneas em Regiões de Teor Salino Elevado: O Caso dos Sistemas Aquíferos Fissurados no Semiárido Nordestino**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18., 2019, Salvador. Anais... Salvador: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2019.
- OLORUNFEMI, M. O.; DAN-HASSAN, M. A.; OJO, J. S. **On the scope and limitations of the electromagnetic methods in groundwater prospecting in a Precambrian basement terrain a Nigerian case study**. Journal of African Earth Sciences, v. 20, n. 2, p. 151-160, 1995.
- PEIXOTO, J. P. OORT, A. H. **Lê cycle de l'eau et le. La Recherche. Spécial: L'eau**, v.21, p. 570-79, 1990.
- PROASNE. PROGRAMA DE APOIO AO SANEAMENTO BÁSICO NO NORDESTE. Ministério de Minas e Energia. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial. **A água subterrânea no mundo, 2003**.
- REBOUÇAS, A. C. **Águas subterrâneas nas grandes metrópoles: água subterrânea no novo modelo do saneamento básico, 1996**.
- REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Escrituras, 2002. 702 p.
- ROSCOE, M. C. **Handbook of Ground Water Development**. Wiley, New York, 1990. p. 34-51.
- SAID, A. M.; THOMPSON, P. J. **Evaporation in the Tropics. Part II: Field Observations of Evaporation from a Wetland in Northern Australia**. Journal of Hydrology, v. 253, n. 1-4, p. 99-119, 2001.
- SAMPAT, Payal. **Expondo a poluição freática**. In: WORLDWATCH INSTITUTE. Estado do Mundo: 2001. Relatório Anual do WWI-Worldwatch Institute/UMA-Universidade Livre da Mata Atlântica, 2001.
- SHAH, T. **Taming the Anarchy: Groundwater Governance in South Asia**. New Delhi, Índia: Routledge, 2016.
- SHIKLOMANOV, I.A. **World Water Resources: A New appraisal and assesment for the 21° Century**. Paris, UNESCO, 76p., 1998.
- SILVA, A.L.M.S. **Águas subterrâneas: critérios em seu uso**. Fórum Internacional das Águas, 2003.

- SILVA, J. M., SANTOS, A. B., OLIVEIRA, R. F. **Caracterização hidrogeológica do aquífero Tubarão no estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Geociências, 52(3), 300-315, 2020.
- SINGH, A. K., SINGHAL, D. C., GUPTA, R. P. **Application of geophysical methods for groundwater investigations in hard rock areas: a case study from Maheshpur, Sahibganj district, Jharkhand, India**. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(3), 127.
- SMA- Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Projeto GEF: Gerenciamento Integrado e Sustentável do Aquífero Guarani, 2000**.
- SOPHOCLEOUS, M. **Groundwater resources assessment and management**. CRC Press. 2018.
- SOUSA, R. T. et al. **Qualidade química das águas subterrâneas em áreas rurais do município de Altamira, Pará**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 2, p. 137-143, 2018.
- SOUZA, M. F., SANTOS, R. L., SOUZA, C. C., BEZERRA, M. T. **Caracterização hidrogeológica do Aquífero Alter do Chão no Estado do Pará, Amazônia Oriental, Brasil**. Revista Brasileira de Geociências, 50(3), 2020.
- TEIXEIRA, W., WATANABE, M., AUN, N. **Caracterização hidrogeológica do Aquífero Barreiras no Estado da Bahia, Brasil**. Águas Subterrâneas, 2020, 34(1), 27-38.
- TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater Hydrology**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005
- TRIMMER, W.L. **Measuring well water level**, Extension Service: Oregon State University Sea Grant Extension Ec 136. 2000.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. 2 ed. São Carlos: RiMA, 2005.
- UNESCO- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Groundwater – A Hidden Resource, 2021**. Disponível em: <https://en.unesco.org/themes/water-security/>; Acessado 15 de janeiro de 2023.
- USGS- United States Geological Survey. **Groundwater Use in the United States, 2021**. Disponível em https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/groundwater-use-united-states?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects; Acessado em 17 de janeiro de 2023.
- VASCONCELOS, S. M. S.; TEIXEIRA, Z. A.; ALVEZ NETO, J. **Caracterização do Aquífero Jandaíra, porção situada no estado do Ceará, Brasil**. Revista de Geologia, Fortaleza, n.23, v.1, 2010.
- Wrege, M. **Termos hidrogeológicos básicos**. Caderno Técnico ABAS, São Paulo,. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 32p, n.4 ago. 1997
- WSS – **Water Science School 2019** in <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school>. Acessado em 15 de Março de 2022
- Zhao, Y., Zhang, F., Liu, J., Chen, F. **Application of geophysical prospecting methods in deep groundwater exploration in Liaoning, China**. Environmental Earth Sciences, 202180(4), 152.