

CAPÍTULO 7

Potencial Hidrogeológico do Cerrado

Vagney Aparecido Augusto

José Eloi Guimarães Campos



7.1 Introdução

A frase “o Cerrado é o berço das águas” é comumente dita pelas pessoas que habitam a ampla região de distribuição deste bioma. Entretanto, a maior parte das pessoas, aparentemente, não entende o real significado dessa expressão.

A região do Cerrado tem um clima com marcante sazonalidade, evidenciada pela variação regular da umidade do ar, da temperatura, da nebulosidade, da evapotranspiração e das chuvas em certos períodos do ano. As chuvas são abundantes nesta região, variando em médias entre 1,5 mil e 1,2 mil milímetros por ano, contudo, são mais frequentes entre outubro e abril e menos frequentes entre maio e agosto.

Assim, como explicar que o Cerrado seja o berço das águas, se em média existe um período de 4 a 5 meses sem chuvas ou com baixa taxa de precipitações? A resposta a essa questão não está diretamente associada ao clima dos Cerrados, mas às suas águas subterrâneas. A disponibilidade de água na região do Cerrado deve ser pensada como a soma das águas excedentes das chuvas (nos períodos chuvosos) mais a produção hídrica dos aquíferos (nas épocas de secas).

Uma cena emblemática é a observação de uma vereda alagada ou de um córrego com água no pico do período seco, em que, mesmo sem a ocorrência de nenhuma chuva em mais de 120 dias, é possível observar água corrente em seu leito a uma distância de 1 km ou 3 km de sua nascente (Figura 7.1). Sem dúvida, o fluxo desse curso de água não é de escoamento de chuvas, mas mantido a partir da descarga do reservatório subterrâneo (aquífero).

A importância das chuvas para os mananciais é fácil de ser verificada. Basta iniciar as primeiras chuvas que a paisagem se transforma, de um ambiente seco amarelado para uma paisagem verde, tanto em áreas naturais quanto de lavouras não irrigadas. Por outro lado, é perceptível que as vazões dos cursos de águas superficiais aumentam logo após o início das chuvas. Entretanto, a importância das águas subterrâneas para a manutenção hídrica das nascentes, córregos, rios

e lagoas não é de fácil percepção, pois se trata de um manancial pouco tangível e não visível.

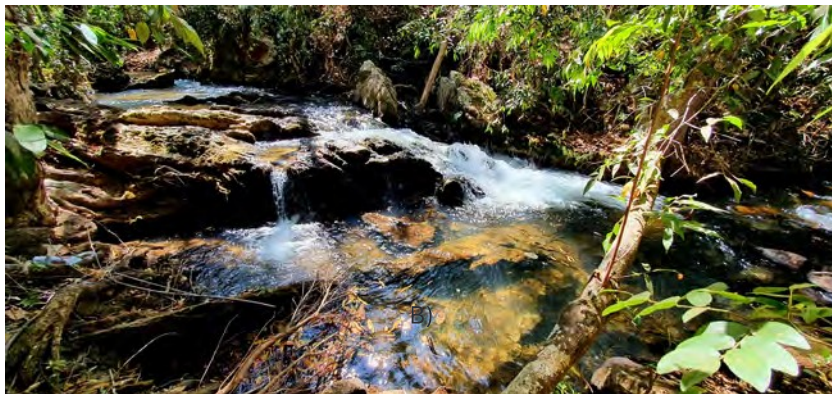


Foto: Vagny A. Augusto

Figura 7.1. Trecho do Ribeirão Santana cerca de 3 km de sua nascente, em agosto de 2022, no período seco, Distrito Federal.

Historicamente no Brasil, as águas subterrâneas não têm recebido, até o momento, a mesma atenção por parte das políticas públicas, gestores ou mesmo pelos setores usuários das águas, em comparação aos recursos hídricos superficiais.

Os mecanismos de armazenamento e circulação das águas subterrâneas são em grande parte desconhecidos pela sociedade e, por isso, os impactos, benefícios e sua importância para os ecossistemas, abastecimento humano e produção agrícola são negligenciados.

Assim, o objetivo deste Capítulo é apresentar os conceitos gerais sobre as águas subterrâneas, as funções e classificação dos aquíferos, e sua importância para a região do Cerrado. Dentro do possível, será utilizada linguagem acessível com apresentação de exemplos observados na própria região.

Os dados e informações apresentadas neste texto são provenientes de trabalhos técnicos e acadêmicos e da experiência dos autores sobre a hidrogeologia da região do Cerrado.

7.2 Aspectos conceituais

Aquífero é todo reservatório de água subterrânea, sendo representado por materiais naturais incluindo diferentes tipos de rochas ou solos (Fetter, 2004). O aquífero é dividido em duas porções principais: zona não saturada (ou de aeração) e zona saturada, tendo entre elas a zona de transição ou franja capilar (Figura 7.2). A descarga dos aquíferos mantém a perenidade dos cursos d'água superficiais nos períodos secos do ano.

Os aquíferos podem ser classificados em função dos tipos de espaços vazios que os compõem, estes espaços vazios são denominados em conjunto de porosidades. A classificação básica fundamentada nos tipos de porosidades inclui três grupos: aquíferos intergranulares, fraturados ou fissurais, e cársticos.



Figura 7.2. Seção esquemática mostrando as diferentes zonas do aquífero e suas relações com o rio.

Ilustração: Vagney A. Augusto

Os aquíferos intergranulares (Figura 7.3) são aqueles em que a água está armazenada entre grãos e/ou fragmentos, ou seja, os reservatórios formados por solos (materiais inconsolidados) ou por rochas sedimentares (consolidadas ou maciças) (Freeze; Cherry, 1979). Aquíferos intergranulares rasos em solos são amplamente utilizados pela po-

pulação, sendo representados por perfis de solos mais espessos. Em muitas cidades e áreas rurais da região do Cerrado, no Brasil, existem centenas de poços escavados de grandes diâmetros (cisternas ou cacimbas), que são construídos manualmente nesse tipo de aquífero, e servem como a principal fonte de água subterrânea para a população.

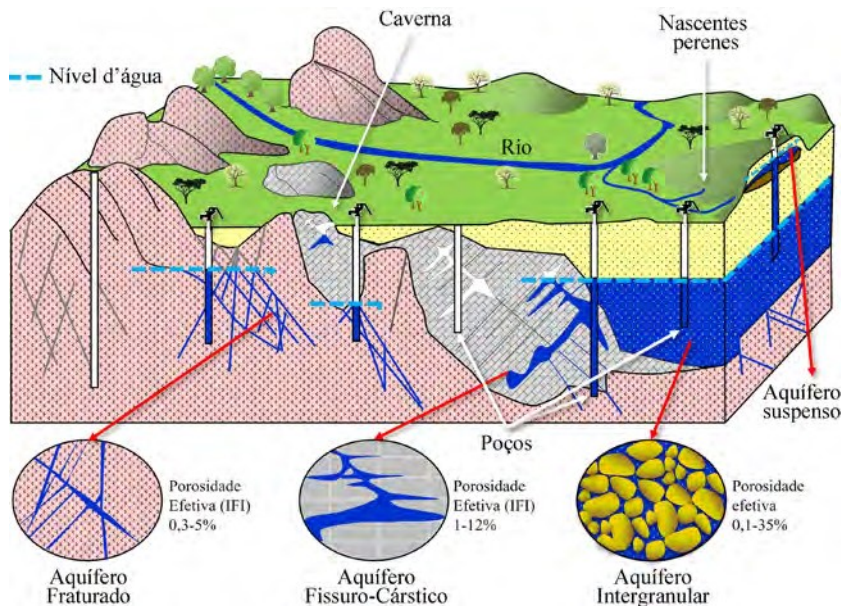


Figura 7.3. Modelo esquemático mostrando os principais tipos de aquíferos inter-relacionados (Fraturnado, Cárstico e Intergranular) com diferenças entre níveis d'água e das fontes hídricas dos respectivos poços.

Ilustração: Vagney A. Augusto

Os aquíferos fraturados englobam aqueles formados principalmente a partir das rochas metamórficas e ígneas (também chamadas genericamente de cristalinas). Nesse caso, a água apenas ocupa as pequenas fendas presentes nos maciços rochosos, o que resulta em menor espaço para armazenamento (Feitosa et al., 2008). Nesse ambiente, também há muitos poços secos ou de baixas vazões (ou com pouca água).

Em rochas carbonáticas, são desenvolvidos os denominados aquíferos cársticos. Essas rochas têm a propriedade de se dissolver e formar grandes espaços internamente, resultando em cavidades, cavernas, abrigos ou grutas associadas a sumidouros e surgências. Nesse caso, é comum a presença de águas "duras" ou salobras devido ao elevado teor de bicarbonato (HCO_3^-) e cálcio (Ca^{2+}), que compõem os minerais das rochas. Águas "duras" são ricas em elementos/íons que causam problemas para a ação dos sabões, para cozimento e para sua utilização na indústria. Já as águas salobras são ricas em sais dissolvidos das rochas. A região nordeste do estado de Goiás pode ser citada como um exemplo desse tipo de aquífero na região do Cerrado (por exemplo, município de Mambai, GO).

Outra proposta de classificação dos aquíferos divide-os genericamente em rasos e profundos. Os aquíferos rasos são tratados como livres ou freáticos e têm o topo da zona saturada sob condições de pressões atmosféricas. Alguns aquíferos freáticos, apesar de serem na maioria rasos, podem ter seu topo naturalmente a maiores profundidades (até maiores que cem metros). Um exemplo desta condição na região do Cerrado ocorre no extremo oeste do estado da Bahia, próximo à divisa com o estado de Goiás.

Os aquíferos rasos ou freáticos (Figura 7.4) têm grande importância para a sociedade, representando os primeiros reservatórios subterrâneos explorados para uso geral desde o início da humanidade. Também por serem livres e rasos, são vulneráveis aos processos de contaminação. Contudo, na ótica de recargas/descargas dos aquíferos, eles recebem anualmente a renovação cíclica de seus recursos hídricos com a infiltração parcial das águas de chuvas, e mantêm a perenidade das nascentes e cursos d'água superficiais ao longo do ano.

Os aquíferos profundos, em muitos casos, não têm contato direto com a atmosfera e são relativamente isolados, devido a camadas de rochas menos permeáveis acima deles ou pelos próprios aquíferos mais rasos que os sobrepõem (Figura 7.4). A grande diferença entre os aquíferos rasos e profundos está nas condições de armazenamen-

to, circulação e na capacidade de renovação das águas. Os aquíferos profundos demandam centenas de anos ou mais para a renovação de seus recursos hídricos, isso quando são conectados aos aquíferos sobrepostos, e muitos deles não têm seus recursos hídricos renováveis. Quando sistemas de aquíferos rasos e profundos coexistem e são hidráulicamente conectados, eles estão em equilíbrio mútuo e são interdependentes, de maneira que interferências em um podem refletir nas consequências que afetam a estabilidade do outro.

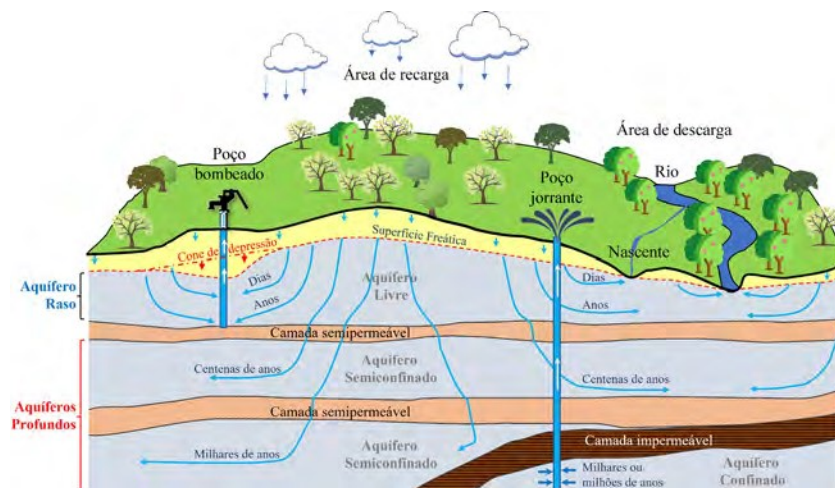


Figura 7.4. Modelo hidrogeológico esquemático ilustrando aquíferos intergranulares rasos e profundos com as respectivas diferenças temporais dos fluxos naturais de recarga.

Ilustração: Vagney A. Augusto

Outra classificação dos aquíferos é relativa às condições de pressão na qual a água subterrânea está submetida, sendo classificados em livres, semiconfinados ou confinados. Os aquíferos livres têm contato direto com a atmosfera e estão abertos à infiltração das águas de chuvas. Quando o topo da zona saturada (superfície freática) do aquífero está submetido à pressão atmosférica, ele é chamado de livre

ou freático, independentemente dos tipos de rochas ou solos que o compõem.

Os aquíferos confinados são aqueles que estão entre camadas impermeáveis ou estruturalmente aprisionados, sem troca de fluxo hídrico com seu entorno. Os aquíferos confinados geralmente estão em condições de sobrepressões (pressões superiores à da atmosfera), reflexos da presença de massas rochosas que favorecem o aprisionamento hídrico subterrâneo. Essa sobrepressão também reflete as condições hidrodinâmicas impostas pela presença de camadas impermeáveis no entorno, condicionando um confinamento total das águas subterrâneas nele armazenadas. Os aquíferos confinados, quando perfurados, favorecem a subida do nível de água acima do seu topo ou, em alguns casos, podem jorrar águas até acima da superfície do terreno, formando os conhecidos poços artesianos ou poços jorrantes.

Os aquíferos semiconfinados são aqueles que estão parcialmente confinados, uma situação intermediária entre livres e confinados, ou seja, estão parcialmente aprisionados por camadas semipermeáveis ou em condições estruturais que permitem parcialmente o fluxo hídrico subterrâneo.

Aquíferos suspensos são livres mas recebem essa nomenclatura adicional pela sua posição, que sempre ocorre acima de outro aquífero regional mais amplo (Figura 7.3). No geral, são aquíferos limitados a pequenas áreas e não armazenam grandes reservas hídricas. Esses são comuns em rochas sedimentares ou em sedimentos inconsolidados, onde existem diferentes camadas com propriedades hidráulicas distintas. Sua formação é reflexo da presença de camadas menos permeáveis que causam o retardo ou interrupções das percolações descendentes das águas subterrâneas, formando acima dessas camadas zona saturada dentro da zona não saturada do aquífero regional. Esse tipo aquífero é comumente observado em regolitos/solos espessos, onde podem ser condicionados por níveis impermeáveis. Também é frequentemente encontrado no Cerrado, apesar de suas limitações

quantitativas, tem grande importância na manutenção de nascentes, veredas, brejos e favorece fluxos de base das drenagens.

Porosidade efetiva, índice de fraturamento interconectado e índice de carstificação representam, respectivamente, o percentual de espaços disponíveis para o fluxo de água dentro do volume total dos aquíferos intergranulares, fraturados e cársticos. É importante salientar que a porosidade efetiva reflete o volume total de espaços interconectados disponíveis para armazenamento hídrico nos aquíferos, e não o volume total de água possível de extração. Uma parte da água é sempre impedida de ser extraída devido às propriedades físicas de retenção, condições de armazenamento ou limitações do sistema de bombeamento do poço.

Os aquíferos têm três funções principais no ciclo hidrológico regional: (a) função de filtro; (b) função reguladora; e (c) função de reservatório.

A função de filtro corresponde à capacidade de depuração de eventuais cargas contaminantes e de impurezas presentes na atmosfera e em superfície. Nesse contexto as partículas finas, metais, organismos patogênicos e demais substâncias tóxicas podem ser retidas e/ou transformadas pelo arcabouço do aquífero, principalmente pela matéria orgânica e argilas presentes na zona não saturada do aquífero.

A função reguladora corresponde à função ecológica do aquífero e se refere à manutenção dos cursos de água superficiais e ecossistemas relacionados durante o período sem chuvas. Esta função é exercida pela variação anual do nível de água na zona de transição do aquífero (Figura 7.2). A água que alimenta as nascentes e rios vem da descarga do aquífero, cujo nível freático se eleva anualmente com a recarga de águas no período das chuvas. Após o término das chuvas, o nível freático segue rebaixando continuamente (descarregando) para manter regular os fluxos superficiais nos períodos secos.

O período de recessão das chuvas funciona como momento de estresse hídrico do ano, com baixa umidade do solo, diminuição das va-

zões dos córregos e nascentes e rebaixamento natural dos níveis de água nos aquíferos.

A função de reservatório é desempenhada na zona saturada do aquífero e corresponde ao armazenamento da água retida nos espaços dentro das rochas/solos por períodos prolongados. Desta forma, o aquífero pode ser considerado um local de reserva de água para uso humano e os demais elementos da natureza. Uma grande vantagem deste tipo de reservatório (aquífero) é sua capacidade de proteger a água contra processos de contaminação, evaporação, e do rápido escoamento das águas para os oceanos.

É importante salientar que o bombeamento e retirada de água dos aquíferos resulta em um rebaixamento dos níveis de água e mudanças em seu equilíbrio, podendo haver ampliação da recarga em alguns casos específicos, diminuição das vazões em cursos d'água superficiais, misturas de águas com profundidades diferentes e inversão de fluxos subterrâneos.

As águas subterrâneas também têm papel na estabilização geotécnica dos solos e rochas, tanto na zona saturada quanto na vadosa. Isso ocorre porque a água preenche os espaços nas rochas e solos e é adsorvida por minerais, aumentando o seu volume e exercendo uma pressão hidrostática multidirecional, que aumenta estabilidade ao sistema. Em outro sentido, a retirada de água subterrânea pode causar instabilidade, favorecer colapsos e/ou afundamentos da superfície do solo e gerar danos em infraestruturas como prédios, casas, estradas e plantações. Em casos específicos, essa instabilidade pode levar a acomodações no subsolo e perda irreversível na capacidade de armazenamento do aquífero.

Outro conceito importante no âmbito de ocorrências e das relações de interdependências entre aquíferos são os sistemas aquíferos. Um sistema aquífero pode ser definido como uma unidade geológica ou conjunto de camadas de rochas, constituídas por diferentes subtipos de aquíferos com comportamento e propriedades hidráulicas distintas, que são conectados lateralmente e/ou verticalmente. Na prática,

um sistema aquífero requer a existência de subtipos de aquíferos inter-relacionados hidráulicamente.

Para melhor entendimento sobre os sistemas aquíferos citam-se os seguintes casos:

- Sistema Aquífero Guarani, conhecido internacionalmente, é composto pelas unidades geológicas Botucatu e Piramboia que contêm subtipos aquíferos que variam verticalmente e lateralmente entre livre, semiconfinado e totalmente confinado. Esses subtipos, inclusive apresentam parâmetros hidráulicos distintos e são integrados em um sistema aquífero.
- Sistema Aquífero Urucuia representado por um grupo de rochas denominado Grupo Urucuia, sendo constituído por subtipos que variam verticalmente, incluindo livre, confinado ou semiconfinado e suspenso.

7.3 Aspectos legais sobre o uso das águas subterrâneas

Na legislação brasileira, as águas subterrâneas estão sob o domínio dos estados, e do Distrito Federal. Cada estado tem a responsabilidade de regulamentar, gerenciar e autorizar (outorgar) o uso das águas subterrâneas, exceto para produção de água mineral e águas termais (>25°C), que é de responsabilidade da União, executada pela Agência Nacional de Mineração (ANM).

Na natureza, boa parte das águas subterrâneas e superficiais são interconectadas e interdependentes, entretanto, na legislação brasileira de recursos hídricos essas foram tratadas em separado. A gestão das águas subterrâneas cabe aos estados, enquanto das águas superficiais é compartilhada entre União e estados. Para evitar ou resolver problemas/conflitos na gestão das águas, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) emitiu a resolução nº 202, de 28 de junho de 2018, que estabelece novas diretrizes para ações de gestão integradas

e articuladas entre os órgãos reguladores (federal, estadual e distrital). Com isso, a gestão dos recursos hídricos deve ser integrada, aplicáveis aos aquíferos livres e rios perenes onde exista conectividade direta entre águas superficiais e subterrâneas.

Os estados têm autonomia para regulamentar e definir os critérios de uso das águas subterrâneas. Cada estado pode utilizar distintos critérios para autorização de seus usos, podendo coexistir diferentes regras de uso para o mesmo aquífero/reservatório. Isso ocorre porque os aquíferos são formações geológicas naturais que não seguem os limites estaduais, e podem ultrapassar dois ou mais estados, ou países. Isso também é reflexo de uma legislação implantada com observância incompleta dos aspectos naturais das águas subterrâneas, gerando diferenças na definição de critérios sem considerar aspectos técnicos para o uso sustentável dos recursos subterrâneos.

No Cerrado, considerado o “berço das águas”, os critérios de outorga para o uso de suas águas subterrâneas não estão diretamente relacionados com as condições hidrogeológicas, comportamento climático, o uso e a ocupação do solo e sua relação com o Cerrado. Os critérios de outorga nos estados onde ocorre o Cerrado podem ser agrupados em objetivos e subjetivos. Os critérios objetivos são claramente definidos e delimitam de forma objetiva as condições para outorga. Já os critérios subjetivos são amplos e não delimitam condições precisas para outorga, e podem ser dependentes da subjetividade do avaliador ou do órgão gestor.

Neste contexto, as 11 unidades da federação que compõem o Cerrado dispõem de 15 critérios, sendo oito objetivos e sete subjetivos (Figura 7.5). Até o momento, o Distrito Federal é a única unidade federada que apresenta mais critérios objetivos, buscando uma relação com as condições de disponibilidade hídrica e sustentabilidade dos recursos. Nos demais, os critérios refletem exigências administrativas sem correlação direta com as condições hidrogeológicas locais. Isso pode condicionar uma gestão ineficiente desses recursos e, assim, favorecer o colapso do uso dos recursos hídricos subterrâneos a médio e a longo prazos, bem como o surgimento de conflitos entre os usuários.

Critérios de Outorgas para Águas Subterrâneas no Cerrado																
UF	Critérios Objetivos								Critérios Subjetivos							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
PI	48,0	50%	35 anos													
MA	60,0	100%	35 anos													
BA	43,2	D ¹	35 anos		D ¹									D ¹		
TO	21,6	100%	35 anos						S						S	
DF	5,0	75%	10 anos	20 h		D	D	D	S	D	S					
GO	86,4	100%	12 anos									S	S		S	
MS	10,0	100%	10 anos	20 h	200							S				
MT	10,0	80%	35 anos						S							
RO	86,4	100%	5 anos						S	S	S					
MG	10,0	100%	35 anos		200				S			S			S	
SP	15,0	100%	10 anos						S	S	S					
PR	43,2	100%	20 anos	20 h					S			S	S			

D - Critérios com definição clara.
S - Critérios sem definição ou muito abrangentes.
¹ – ver Instrução Normativa INEMA nº03/2022

Exigências técnicas em todas UF

- Análises físico-químicas e bacteriológicas
- Teste de bombeamento/vazão
- Dados construtivos e litológicos do poço
- Plano de uso da água

Critérios Objetivos	Critérios Subjetivos
1. Usos insignificantes (m³/dia)	9. Estudos hidrogeológicos
2. Vazão nominal do poço (%)	10. Análises por finalidade de uso
3. Prazo máximo de outorgas (anos)	11. Análises das fontes de contaminação
4. Tempo máximo de bombeamento (h)	12. Análises de interferências entre poços
5. Distância mínima entre poços (m)	13. Vazão média do aquífero
6. Reserva explotável por aquífero (m³/ano)	14. Vazão sustentável do poço
7. Capacidade de recarga do aquífero	15. Fatores econômicos e sociais
8. Vazão de segurança do aquífero	

Figura 7.5. Lista de critérios considerados para solicitação e autorização de outorga de direito de usos das águas subterrâneas nas unidades da federação inseridas parcialmente no bioma Cerrado, atualizada em 2022.

Outro aspecto importante no cenário nacional das águas subterrâneas, que também reflete similaridade no Cerrado, é o grande número de poços tubulares irregulares (sem regularização). De acordo com o Instituto Trata Brasil, dados de 2018, 88% dos poços existentes no Brasil são irregulares (Hirata et al., 2019), os quais não seguem recomendações técnicas construtivas e não têm controle sobre uso. O

mesmo estudo indica que em Goiás, estado com grande parte do território coberto pelo Cerrado dispõe em aproximadamente cem mil poços tubulares perfurados, dos quais 97% são irregulares e estima-se que cerca de 65 mil estão em áreas rurais.

Na base de dados do Serviço Geológico do Brasil (SIAGAS) consultada em julho de 2021 (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 2022), foram obtidos dados de 56,5 mil poços dentro do bioma Cerrado (Figura 7.6). Esses poços indicam vazões somadas totais de 300 mil metros cúbicos por hora (7,2 bilhões de litros/dia), o que representa volume inferior a real extração de águas subterrâneas. É importante salientar que nessa base de dados não são considerados os poços escavados (cisternas) e nascentes, pois, no geral, essas extrações são legalmente consideradas como usos insignificantes, não demandam outorga e em alguns estados apenas requerem seu cadastramento.

Entretanto, é consenso que os usos insignificantes, inclusive pela facilidade de acesso, representam números muito maiores do que os poços tubulares. Embora a quantidade dos usos insignificantes seja desconhecida pelos órgãos gestores, eles têm grande importância para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. De acordo com o Instituto Trata Brasil (Hirata et al., 2019), considerando dados atualizados até 2018, os quatro principais estados que mais dependem das águas subterrâneas para o uso rural são Minas Gerais, São Paulo, Bahia e Goiás, nas unidades da Federação onde o Cerrado está inserido.

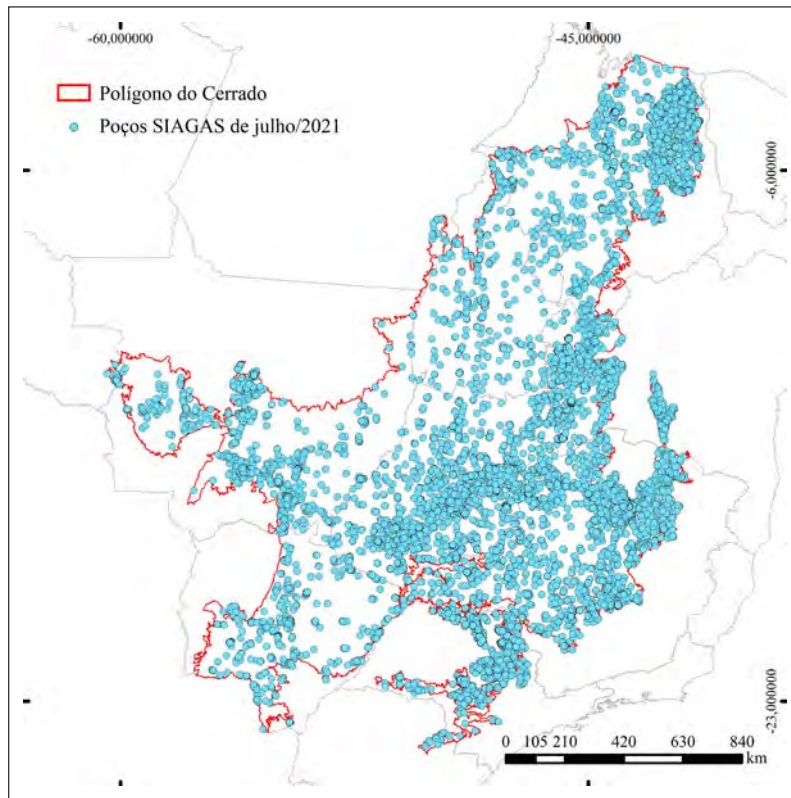


Figura 7.6. Mapa com a distribuição dos 56,5 mil poços na área do bioma Cerrado.

Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2022).

7.4 Potencial dos aquíferos rasos e profundos no Cerrado

Na região do Cerrado, ocorrem aquíferos intergranulares, fraturados e cársticos, em uma razão aproximada, respectivamente de 60%; 38% e 2% da área total (Figura 7.7). A porção enquadrada como aquífero intergranular pode ser dividida em aquíferos rasos e profundos, sendo essa classificação relacionada à profundidade das camadas que compõem os reservatórios. Solos e sedimentos inconsolidados pouco espessos e subsuperficiais são os aquíferos rasos e arenitos de

formações geológicas espessas (em geral mais profundas que 50 m) representam os aquíferos profundos. Os aquíferos fraturados têm potencial hídrico restrito, sendo apenas utilizados para complementação do abastecimento humano ou para suprir água a pequenas comunidades isoladas, não sendo viável para uso em irrigação ou uso intenso.

O potencial produtivo dos aquíferos é definido pela sua transmissividade, que pode ser compreendida como o produto da permeabilidade do material por sua espessura saturada, ou seja, a quantidade de água que flui horizontalmente no aquífero.

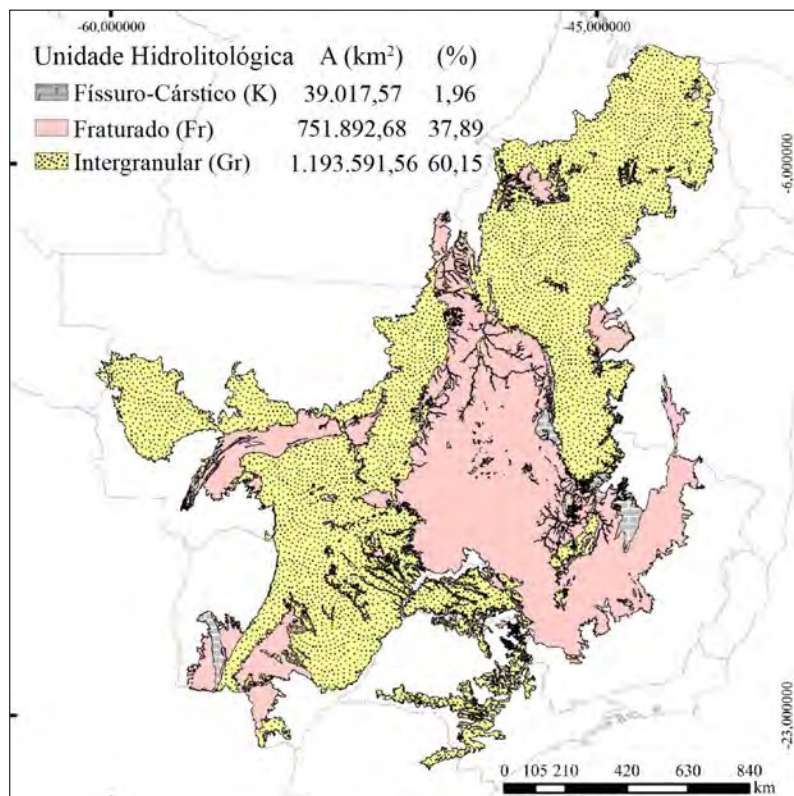


Figura 7.7. Mapa de ocorrência e proporcionalidade de área (A) dos tipos de aquíferos no Cerrado.

Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2010).

7.4.1 Potencial dos aquíferos rasos

O potencial e as recargas dos aquíferos rasos estão intrinsecamente relacionados aos tipos de coberturas inconsolidadas ou solos. As coberturas inconsolidadas são representadas nos mapas de solos (Figura 7.8), recobrendo toda a área do Cerrado e estão representadas principalmente por solos classificados como: latossolo (43%), neossolo quartzarênico (20%), plintossolo (10%), argissolo (10%), cambissolo (8,5%) e outros (8,5%).

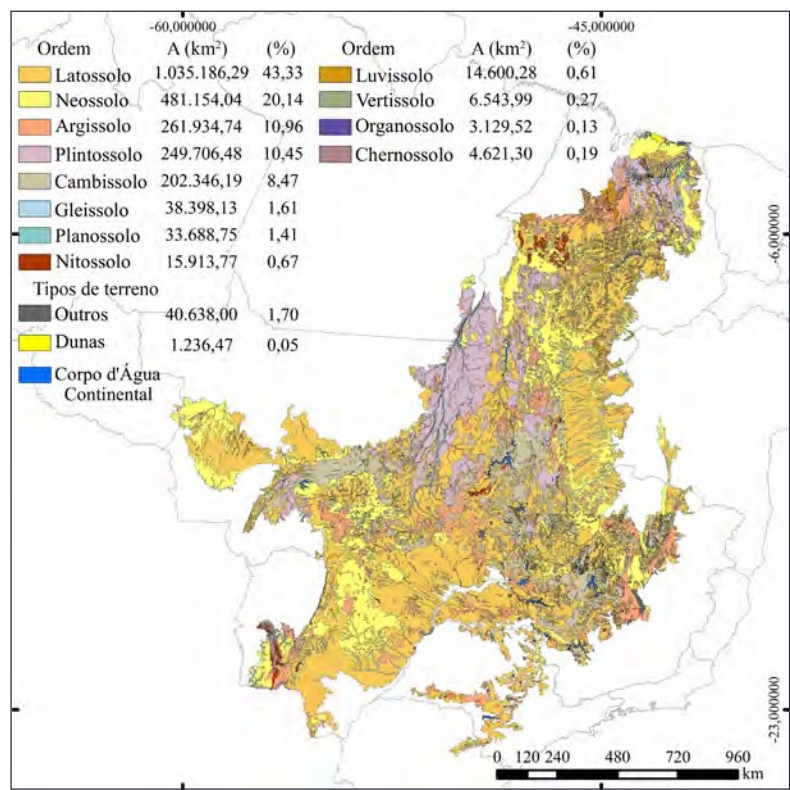


Figura 7.8. Mapa de ocorrências dos tipos de solos do Cerrado, e sua proporcionalidade em área. Os latossolos e neossolos quartzarênicos representam áreas mais favoráveis para a recarga dos aquíferos.

Fonte: IBGE (2021).

Os plintossolos e cambissolos não correspondem a áreas favoráveis para a recarga dos aquíferos devido à sua baixa permeabilidade, geralmente formam camadas superficiais pouco espessas que favorecem o escoamento superficial.

Genericamente, as regiões com maior favorabilidade para recarga são as áreas que ocorrem latossolos e neossolos quartzarênicos, que juntos representam mais de 60% da área total do Cerrado. A grande dimensão das ocorrências de solos permeáveis, associadas aos aspectos de relevo, vegetação e clima, reforçam a importância da região do Cerrado quanto à sua favorabilidade para a recarga dos aquíferos.

Os solos enquadrados como argissolos também são bastante importantes na condição de regulação da recarga, pois, embora sejam de textura argilosa ou muito argilosa, são muito estruturados, o que lhes confere elevada permeabilidade, principalmente nos horizontes mais rasos do perfil de solo.

Os aquíferos rasos, embora não tenham elevado potencial para abastecimento, mantendo restritas vazões expressivas nos poços de captação, são fundamentais para a recarga dos aquíferos profundos e para a regularização das vazões dos cursos de água superficiais, incluindo nascentes, córregos, lagos e rios.

Além dos solos, as coberturas inconsolidadas cenozoicas também são enquadradas nos aquíferos rasos, pois não apresentam espessuras saturadas significativas. Neste conjunto podem ser enumerados os colúvios depositados no sopé da Serra Geral de Goiás e os depósitos das planícies dos rios Tocantins e Araguaia (ver Sistema Aquífero Araguaia-Bananal a frente).

7.4.2 Potencial dos aquíferos profundos

Os aquíferos profundos estão relacionados às camadas de rochas profundas, e seu potencial é vinculado ao conjunto de rochas a que

estão associados. Estes reservatórios apresentam potencial variável, e, em alguns casos, é possível bombear dezenas de metros cúbicos de água por hora, enquanto em outros a vazão é limitada.

Com relação ao potencial para irrigação de grandes áreas, apenas alguns sistemas apresentam condições hidrogeológicas adequadas a este tipo específico de uso, que demanda volumes expressivos de água diariamente.

Os aquíferos de grande potencial quantitativo ocorrem em grandes áreas ou em regiões restritas (relativas ao Cerrado como um todo) e associados às bacias sedimentares cuja poligonal ocorre parcialmente dentro do Cerrado (aquíferos intergranulares) (Figura 7.9). Na mesma figura também se observa os aquíferos fraturados, que no geral, não têm potencial hídrico suficiente para uso em irrigação, sendo destinados ao abastecimento de áreas rurais, núcleos urbanos isolados ou para a complementação do abastecimento em grandes cidades.

Importante destacar também que há áreas em que os tipos de aquíferos se sobrepõem, o que favorece a existência de aquíferos intergranulares sobrepondo aquíferos fissuro-cársticos ou fraturados ou outros subtipos intergranulares. Essa sobreposição natural por vezes favorece o confinamento dos aquíferos mais profundos, dificultando ou impedindo sua recarga anual. As ocorrências de aquíferos sobrepostos e a complexidade hídrica gerada devem ser consideradas no planejamento do uso e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

O potencial quantitativo de um aquífero deve considerar os volumes de água acumulados e sua condição de circulação e recarga. A avaliação do potencial de um aquífero, com base apenas na sua porosidade, permeabilidade, transmissividade e espessura pode ser frágil, pois pode se tratar de um reservatório com restrita recarga e assim, sem renovação hídrica, e poderá entrar em colapso após algum tempo de bombeamento.

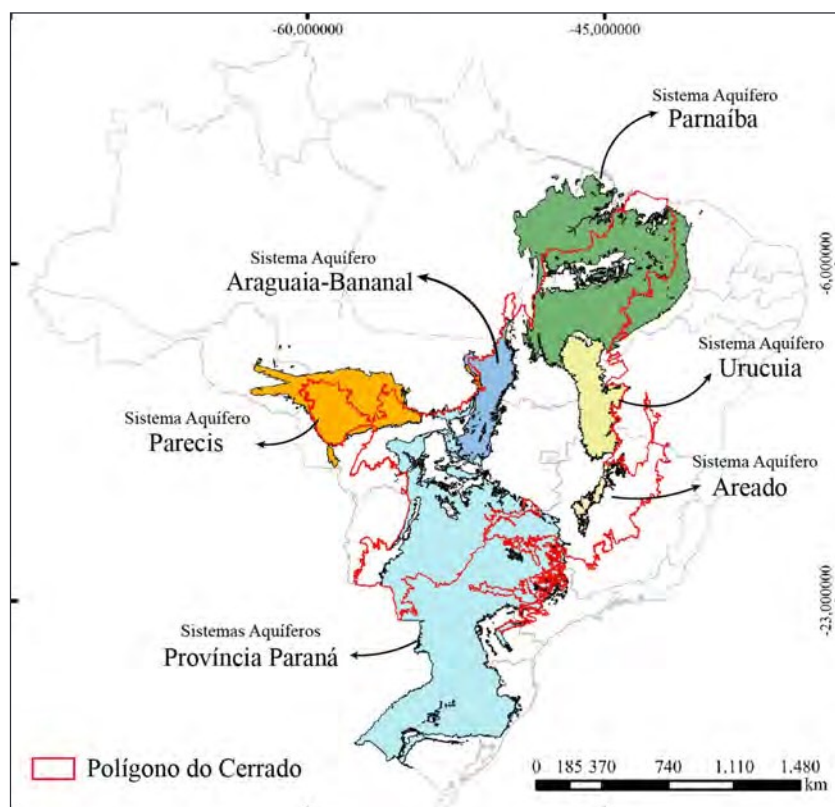


Figura 7.9. Mapa de ocorrência dos principais sistemas aquíferos intergranulares no Cerrado (áreas destacadas em cores). Áreas em branco dentro do polígono do Cerrado marcam os aquíferos classificados como fraturados.

7.5 Principais aquíferos que ocorrem no Cerrado brasileiro

No âmbito do Cerrado, os aquíferos intergranulares mais relevantes ocorrem em regiões de cinco bacias sedimentares de grande extensão geográfica, representadas pelas bacias do: Parnaíba, Parecis, Paraná, Bananal e Sanfranciscana. As bacias do Parecis, Paraná e Parnaíba formam aquíferos que extrapolam os limites do bioma Cerrado.

As bacias hidrogeológicas foram definidas conceitualmente por Arraes e Campos (2007) e Arraes (2008) como a região que corresponde aos limites entre as zonas de recarga e descarga de um determinado aquífero. Entretanto, bacias hidrogeológicas sedimentares também coincidem com os limites das bacias sedimentares, que por sua vez, correspondem aos limites de antigas depressões topográficas que ao longo do tempo geológico foram preenchidas por vários tipos de sedimentos. Esses diferentes tipos sedimentares se sobrepõem e formam grandes pacotes sedimentares sobrepostos somando espessuras que podem atingir centenas de metros. Com a evolução geológica, as camadas sedimentares das bacias se transformam em rochas que armazenam águas subterrâneas e assim formam diferentes aquíferos intergranulares inter-relacionados em sistemas de aquíferos complexos e sobrepostos.

Normalmente, as bacias sedimentares dispõem de vários aquíferos em camadas sub-horizontais, onde parte aflora na superfície e os demais ficam a grandes profundidades. As partes aflorantes (superficiais e rasas) dos aquíferos, em geral, são livres e recebem influência da sazonalidade climática, e funcionam de forma dinâmica com recarga e descarga anuais. Entretanto, cabe frisar que o tempo de resposta nos aquíferos com recarga e descarga por influência das chuvas é muito lento (fluxo hídrico subterrâneo é da ordem de cm/dia).

As águas de chuvas ocorridas hoje podem necessitar de meses para atingir o aquífero, e anos ou centenas de anos para chegarem às zonas de descarga (nascentes e drenagens). Assim, os aquíferos aflorantes podem ter relação direta com as águas superficiais, favorecendo o funcionamento das nascentes, mantendo lagos, riachos e rios perenes mesmo nos períodos de estiagem ou de secas prolongadas. As águas que estão nascendo e mantendo os rios hoje, são reflexos de chuvas ocorridas nas zonas de recarga dos aquíferos contribuintes em anos anteriores. Portanto, os aquíferos funcionam como agentes reguladores do sistema hídrico superficial, recebendo e armazenando água para disponibilizar no futuro.

Os aquíferos profundos em bacias, em geral, são isolados e recebem renovação hídrica anual restrita ou nula, mantendo seus volumes hídricos preservados estagnados por centenas ou milhares de anos. Essas águas são consideradas “fósseis” devido à sua presença estagnada por milhares de anos, que podem dissolver minerais e se enriquecer de sais das rochas, tornando-as salinizadas e, às vezes, não potáveis ou não úteis para outros fins (ex. irrigação) (Appelo; Postma, 1996).

Observe-se que os aquíferos profundos também funcionam como uma base de sustentação física e hidrodinâmica dos sistemas aquíferos superiores (mais rasos), de forma que o seu uso pode interferir diretamente no equilíbrio dos aquíferos superiores (induzir trocas hídricas, reduzir volumes, induzir acomodações de blocos rochosos e do terreno, etc.).

A seguir, estão descritas as principais bacias e seus aquíferos intergranulares presentes no Cerrado, assim como as estimativas de reservas hídricas subterrâneas dos seus principais aquíferos.

As reservas hídricas subterrâneas são estimadas a partir da definição das porosidades efetivas das rochas que o compõem os aquíferos, das espessuras saturadas dos aquíferos, e das dimensões da área de ocorrência. Com esses parâmetros, é possível calcular as reservas hídricas (volume hídrico armazenado) por meio da seguinte expressão simplificada (Costa, 2000):

$$Rp = A \times \eta e \times b$$

em que

Rp = reservas hídricas do aquífero

A = área total do aquífero

b = espessura média saturada do aquífero

ηe = porosidade efetiva média do aquífero

Para os cálculos de reservas hídricas subterrâneas foram utilizadas informações de diversos estudos e dados de poços dos sistemas

SIAGAS/SBG-CPRM, assim como mapas de ocorrências geológicas (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2022). O software ArcMap (Esri) foi utilizado para aplicar funcionalidades de análises espaciais. É importante destacar que os valores calculados são aproximados e visam indicar a dimensão e a grandeza das reservas hídricas subterrâneas no Cerrado, considerando a falta de informações consolidadas sobre o assunto na literatura.

5.5.1 Sistemas aquíferos da província Parnaíba

Estes sistemas de aquíferos coincidem com a área da província sedimentar do Parnaíba, região composta por um sistema de quatro bacias sedimentares sobrepostas. Região que abrange áreas de vários estados do Nordeste brasileiro (Figura 7.10). Entretanto, o Cerrado só ocorre em 57% da totalidade da Província Hidrogeológica do Parnaíba. Essa região é formada por várias formações geológicas das quais, algumas são aquíferos relevantes (rochas arenosas) e outras não são consideradas aquíferos (rochas argilosas) devido à sua baixa capacidade de armazenar ou transmitir águas subterrâneas.

Para efeitos de simplificação dos cálculos de reservas hídricas subterrâneas do sistema aquífero Parnaíba, as unidades aquíferas consideradas foram somente as aflorantes, com ocorrências dentro do Cerrado, assim como segue: unidades denominadas Codó, Itapecuru, Corda, Motuca, Pedra de Fogo, Poti-Piauí, Cabeças e Serra Grande. As unidades Longá e Pimenteiras não foram consideradas para cálculos, pois são formações compostas de rochas não aquíferas (materiais argilosos). Também não foram consideradas as áreas ao nordeste (formação Barreiras) e no centro-oeste da bacia, áreas de ocorrências de aquíferos fraturados onde há poucos dados para estimativas das reservas.

Baseando-se em dados de poços tubulares disponibilizados pelo sistema SIAGAS (julho/2021) e nas áreas poligonais dos aquíferos aflorantes (Agência Nacional de Águas, 2017), as reservas hídricas subter-

râneas de todas as unidades aquíferas intergranulares citadas foram estimadas. Para isso, foram considerados somente dados de poços com profundidade de até 250 m, total de 5.956 poços, e se assumiu uma porosidade efetiva média das unidades de 15%.

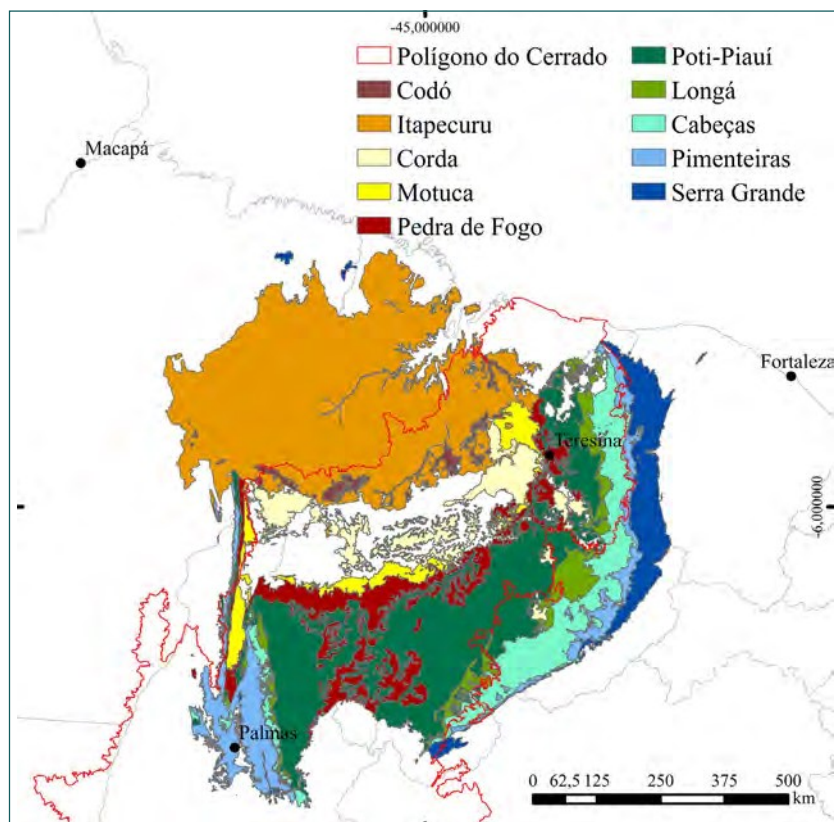


Figura 7.10. Mapa dos aquíferos aflorantes da Província Hidrogeológica do Parnaíba, vinculada à bacia sedimentar do Parnaíba.

As reservas em volumes totais estimados dos sistemas aquíferos do Parnaíba foram de 6.668,22 km³, e desse total, o volume de 3.822,66 km³ (57%) ocorrem no Cerrado. Esse valor corresponde ao somatório das unidades aquíferas do sistema Parnaíba apresentadas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas da Província Aquífera Parnaíba, considerando profundidade máxima de até 250 m.

Unidade aquífera	Nº poços	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km²)	Área de ocorrência no Cerrado (km²)	Reserva total (km³)	Reserva no Cerrado (km³)
Cabeças	906	88,56	49.666,78	20.684,09	659,77	274,77
Codó	41	101,89	8.311,48	7.831,71	127,03	119,70
Corda	201	78,69	35.117,91	34.342,23	414,51	405,36
Itapecuru	1.426	79,66	207.300,75	50.730,15	2.477,04	606,17
Motuca	48	81,29	19.810,95	18.229,45	241,56	222,28
Pedra de Fogo	1.534	88,53	50.547,04	49.018,98	671,24	650,95
Poti-Piauí	1.578	87,08	129.956,12	116.633,54	1.697,49	1.523,47
Serra Grande	222	78,57	32.207,23	1.694,30	379,58	19,97
Total					6.668,22	3.822,66

Importante ressaltar que as reservas aqui estimadas consideram os aquíferos aflorantes e zonas saturadas com profundidades máximas de até 250 m, profundidades típicas de poços usados com fins de produção hídrica. Nessa região existem poços com profundidade de até 1.241 m, que, no geral, são utilizados para fins exploratórios de pesquisas, e que não são comumente utilizados para fins de produção hídrica (estes foram descartados).

Entre os aquíferos mencionados, alguns podem alcançar profundidades superiores a 250 m, chegando a 900 m de profundidade com 650 m de zona saturada (por exemplo o aquífero Serra Grande). Se fossem consideradas as espessuras totais dos aquíferos e todo o volume de água comprimido nos aquíferos confinados, o valor de reserva hídrica subterrânea seria bem maior. No entanto, foi optado por seguir um princípio conservador e utilizar profundidades comuns entre os poços com dados disponíveis e representatividade geográfica. É importante destacar também que as reservas não calculadas (mais profundas) podem ser volumes explotáveis, mas não são necessariamente renováveis ou potáveis. A grande maioria das águas subterrâneas do sistema aquífero Parnaíba são antigas ou fósseis, refletindo as condições geológicas e climáticas da região, que condicionam uma baixa capacidade de renovação hídrica.

Na literatura, os aquíferos mais relevantes desta região são: Serra Grande, Cabeças e Poti-Piauí. São predominantemente compostos por arenitos, com boas espessuras e produção hídrica. No entanto, os aquíferos Serra Grande e Cabeças ocorrem principalmente em profundidades maiores, sendo, portanto, predominantemente confinados. Nestes casos, devido à sobrepressão de confinamento, os poços que os atravessam podem produzir águas jorrantes acima da superfície (poços artesianos). Estes fatos são bem conhecidos na região do Vale do Gurguéia (Piauí), onde já existem vários poços deste tipo abastecendo a região. Já o aquífero Poti-Piauí é considerado livre e compõe a maior reserva hídrica subterrânea aflorante do sistema Parnaíba dentro do Cerrado (Tabela 7.1). O aquífero Itapecuru é do tipo livre e

semiconfinado, tem grande extensão aflorante, mas apenas 25% de sua área está no bioma Cerrado. Suas potencialidades produtivas são consideradas moderadas, mas com boas condições de recarga.

7.5.2 Sistemas aquíferos da província Paraná

Na província Paraná, destacam-se na área do Cerrado os seguintes aquíferos e sistemas aquíferos: Furnas, Ponta Grossa, Guarani, Serra Geral e Bauru (Tabela 7.2 e Figura 7.11).

O Sistema Furnas está associado com rochas conglomeráticas na base e areníticas silicificadas no topo da unidade aquífera, sendo denominado de aquífero de dupla porosidade com espaços de armazenamento hídrico dos tipos intergranulares e fraturas interrelacionadas. Ocorre, de forma livre, nas porções noroeste do estado de Goiás e no sul de Mato Grosso, tendo continuidade para o interior da Bacia do Paraná, onde se apresenta sob confinamento. Na região de Rondonópolis, MT, apresenta vazões expressivas, sendo utilizado para o abastecimento humano e industrial (Cutrim et al., 2021).

O Aquífero Ponta Grossa ocorre na forma de intercalações de rochas arenosas com rochas argilosas, apresentando menores vazões e menor potencial produtivo, não sendo aproveitado para uso em sistemas de irrigação de maiores portes como pivôs centrais.

O Sistema Aquífero Guarani é um dos maiores reservatórios subterrâneos do mundo, ocupando área superior a um milhão de quilômetros quadrados (Araújo et al., 1999; Borghetti, 2004; Oliveira, 2009), saindo do território brasileiro e adentrando na Argentina, Uruguai e Paraguai. No Cerrado, ocorre em áreas de exposição restritas, contudo, pode ser explorado a partir de poços que atravessem toda a espessura das rochas vulcânicas que compõem a camada confinante, acima.

Tabela 7.2. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas da Província Aquífera Paraná, considerando suas áreas de afloramentos com espessura saturada média de 100 m.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Bauru-Caiuá	15	100	353.369,96	211.290,57	5.300,55	3.169,36
Serra Geral	3	100	420.589,50	81.545,24	1.261,77	244,64
Guarani	15	100	89.220,79	52.517,45	1.338,31	787,76
Ponta Grossa	12	100	34.951,60	32.526,24	419,42	390,31
Furnas	10	100	28.738,22	26.358,19	287,38	263,58
Total					8.607,43	4.855,65

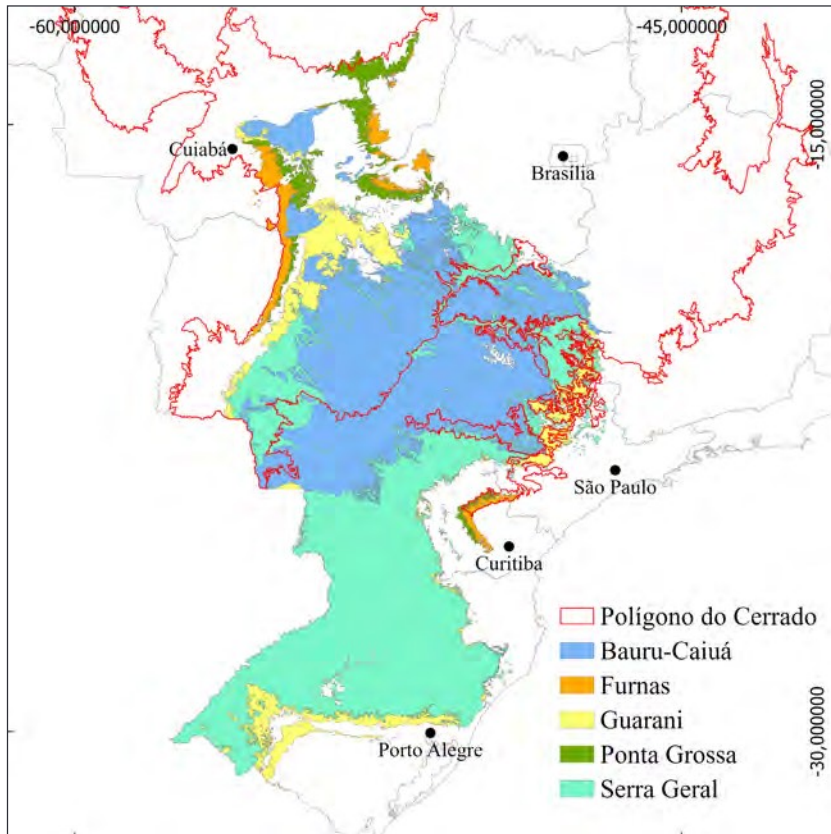


Figura 7.11. Mapa dos aquíferos associados à "Província Hidrogeológica do Paraná", vinculada à bacia sedimentar do Paraná.

Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (2010).

São reservatórios do tipo intergranular, podendo ocorrer de forma livre, semiconfinado ou totalmente confinado. O Sistema Aquífero Guarani tem potencial muito elevado, sendo inclusive possível ser utilizado para irrigação de grandes áreas. Contudo, sua exploração deve ser precedida de estudos específicos, pois em áreas de confinamento (que são predominantes) as condições de recarga são pouco favoráveis.

O Sistema Serra Geral é um aquífero fraturado associado a rochas vulcânicas e, por isso, apresenta vazões mais reduzidas e inclusive poços secos. Entretanto, por ocorrer em amplas áreas de exposição, é um aquífero muito utilizado para o abastecimento de cidades e propriedades rurais na região do Cerrado.

É um aquífero fraturado uma vez que as rochas vulcânicas de composição basáltica não apresentam poros intergranulares, mas apenas uma densa rede de fraturas que permite o armazenamento e transmissão de águas em taxas expressivas, podendo alcançar dezenas de metros cúbicos por hora.

O Aquífero Bauru é do tipo intergranular, associado a arenito e apresenta ampla capacidade de armazenamento de água, sendo um reservatório livre na maior parte de sua ocorrência, com excelentes condições de infiltração e recarga (Prandi, 2010). Na região de Araguari, no Triângulo Mineiro, este aquífero é associado a cascalhos e areias e por isso apresenta vazões médias maiores do que na maior parte das demais áreas de ocorrência (Oliveira, 2002). Neste caso, suas águas são utilizadas para irrigação de lavouras de café.

7.5.3 Sistemas aquíferos da província Centro-Oeste

7.5.3.1 Sistema Aquífero Bananal

Este sistema aquífero coincide com a bacia sedimentar do Araguaia-Bananal, dentro da bacia hidrográfica do Rio Araguaia, região que divide os estados de Mato Grosso, Goiás e Tocantins (Figura 7.9). Essa região é caracterizada por grandes planícies, lagunas, zonas alagadas intermitentes e vários cursos de rios meandrantos (Rio Araguaia e afluentes). Entre as bacias sedimentares já citadas, essa é a bacia com menor espessura de sedimentos e mais recente na evolução geológica. Pois ainda está em processo de formação, recebendo continuamente sedimentos pelo Rio Araguaia e seus afluentes. Estudos de Araújo e Carneiro (1977 citado por Souza, 2017) estimaram que em alguns pon-

tos essa bacia pudesse atingir até 320 m de profundidade. Entretanto, um poço de pesquisa do Serviços Geológico do Brasil na região indicou profundidade de 50 m (Lacerda Filho et al., 1999). Entre os poços do SIAGAS foram observadas profundidades pouco maiores que 70 m na região de Jussara, GO.

Essa bacia é preenchida pela Formação Araguaia, que é composta de sedimentos aluviais (oriundos do rio) e lacustres (oriundos de lagoas) intercalados. Os sedimentos são representados predominantemente por areia, cascalho, silte e argila semiconsolidados e inconsolidados, com presença de concreções ferruginosas.

O banco de dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (SIAGAS) (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2022) conta com poucos poços na região do aquífero (dados de julho de 2021). Contudo, na região norte do aquífero os dados existentes indicam baixas capacidades produtivas dos poços e grandes rebaixamentos dos níveis de água (nível dinâmico) durante o bombeamento. Isso é um indicativo de que boa parte desses poços ultrapassa os sedimentos e captam água dos sistemas de aquíferos fraturados abaixo, em rochas cristalinas menos produtivas. Na região Sul, no município de Jussara, GO, os poços indicaram boa capacidade produtiva e espessa camada de sedimentos. Neste contexto, para os cálculos de reservas hídricas subterrâneas, visando simplificações, esse aquífero foi tratado como unidade indistinta, com espessura saturada média de 30 m e porosidade efetiva média de 12% (Tabela 7.3).

O Sistema Aquífero Bananal é um tipo de aquífero livre e relativamente vulnerável. Suas reservas hídricas funcionam de forma interconectada aos sistemas de águas superficiais que o compõem (Rio Araguaia e afluentes). Consequentemente, seu uso e gestão devem observar os impactos mútuos entre sistemas hídricos superficiais e subterrâneos. Na prática, o Sistema Aquífero Bananal é parte essencial de um ecossistema local, que envolve um equilíbrio mútuo de funcionamento e manutenção de diversas espécies locais e do próprio Rio Araguaia.

Tabela 7.3. Dados e estimativas de reservas hídricas subterrâneas do Sistema Aquífero Bananal.

Unidade aquífera	Espessura saturada média (m)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Formação Araguaia	30,0	108.511,53	102.772,40	390,64	369,98

7.5.3.2 Sistema Aquífero Parecis

O Sistema Aquífero Parecis representa um reservatório subterrâneo do tipo intergranular composto por uma sucessão de arenitos, com intercalações de níveis pelíticos e conglomerados pertencentes ao Grupo Parecis. Em função da presença de níveis argilosos, podem ocorrer aquíferos classificados como livres ou confinados. Segundo Silva (2013), os limites definidos deste aquífero são coincidentes com a extensão das rochas do Grupo Parecis.

A área total de distribuição deste aquífero é de 227.290 km², sendo que 108.302 km² ocupam a área de ocorrência do bioma Cerrado. Considerando esta área de ocorrência, 15% de porosidade eficaz e uma espessura saturada média de 108 m a reserva permanente no Cerrado alcança 1.372,30 km³ de água.

7.5.4 Sistemas Aquíferos Urucuia e Areado

Estes sistemas aquíferos integram a Bacia Sanfranciscana, que inclui as unidades sedimentares que compõem os reservatórios subterrâneos. Esta bacia tem uma área que ocupa partes de seis estados brasileiros incluindo o Maranhão, Piauí, Tocantins, Bahia, Goiás e Minas Gerais. A Bacia Sanfranciscana (Urucuia e Areado) após evolução geológica e intensos processos erosivos ocupa atualmente uma área total de 151.158 km² e uma área efetiva de aquíferos menor, de 125.016 km² (Agência Nacional de Águas, 2017) (Tabela 7.4).

O Sistema Aquífero Urucuia tem 99,5% de sua área inserida no bioma Cerrado, enquanto o Sistema Aquífero Areado tem toda a sua área vinculada ao Cerrado. Estes aquíferos foram estudados por Gaspar (2006), Gaspar e Campos (2007) e Agência Nacional de Águas (2017), entre outros autores, e apresentam elevado potencial de produção de água, sendo utilizados inclusive para a irrigação de grandes lavouras pelo sistema de pivôs centrais.

Tabela 7.4. Dados dimensionais utilizados para o cálculo da reserva permanente dos sistemas aquíferos Urucuia e Areado.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Área de ocorrência total (km ²)	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)	Reserva no Cerrado (km ³)
Urucuia	14	128.356,32	127.595,71	1.327,97	1.320,10
Areado	10	22.802,17	22.802,17	104	104

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

O Sistema Aquífero Urucuia é representado majoritariamente por arenitos depositados em antigos desertos de areia, sendo, portanto, muito porosos e funcionando como excelente reservatório de água. Sua área de distribuição apresenta aquíferos livres, semiconfinados ou suspensos.

O Aquífero Areado é heterogêneo e contém principalmente arenitos, em menor proporção, conglomerados/folhelhos. Em muitos casos, os arenitos são cimentados, o que restringe parte de sua porosidade, e, por conseguinte, não apresentam um potencial aquífero muito elevado.

7.6 Outros aquíferos

No contexto do Cerrado (Figura 7.7), ainda existem aquíferos fraturados e os físsuro-cársticos com 38% e 2% respectivamente da área do Cerrado. Estes, junto às coberturas inconsolidadas intergranulares,

representam os aquíferos menos expressivos em termos de volume das reservas de águas subterrâneas. Suas reservas também foram estimadas com base nos dados de poços do SIAGAS (Tabela 7.5).

Tabela 7.5. Dados e estimativas utilizadas para o cálculo das reservas dos aquíferos fraturados, físsuro-cársticos e das coberturas inconsolidadas intergranulares.

Unidade aquífera	Porosidade efetiva (%)	Média da espessura saturada (m)	Nº total de poços nas unidades	Nº total de poços usados na estimativa	Área de ocorrência no Cerrado (km ²)	Reserva total (km ³)
Coberturas	10	13,64	1.807	34	190.525,21	259,87
Fraturados	2	91,44	7.477	7.380	657.252,89	1.208,98
Físsuro-Cársticos	5	71,79	1.312	1.311	36.663,91	131,81

7.7 Sustentabilidade da exploração dos aquíferos no Cerrado

A sustentabilidade do bombeamento de águas subterrâneas deve levar em conta vários aspectos, incluindo o conhecimento do tipo de aquífero, as estimativas da disponibilidade hídrica, a taxa de bombeamento, a condição de circulação e recarga, o parâmetro climático, entre outros.

Como reservatório, o aquífero, pode ser comparado a uma barragem ou um açude, com um volume de água armazenada e outro com reposição anual por meio da infiltração de águas pluviais. Há uma reserva permanente (volumes não renováveis) e uma reserva renovável (volume de água que anualmente entra nos aquíferos).

Se uma barragem é bombeada com uma vazão superior à entrada mais o volume acumulado, ela pode secar em um período variável de tempo, levando ao colapso do sistema para o abastecimento ou para irrigação. O mesmo pode ser dito para o aquífero: se o bombeamento

for superior à recarga, haverá sua sobreexploração, ou seja, uma redução contínua dos níveis de água. Como um reservatório de superfície, o aquífero também pode se esgotar, como já ocorreu nos EUA (Alley et al., 1999; Galloway et al., 1999; Konikow, 2015), na China (Qiu, 2010) e na Índia (Bhattarai et al., 2021; Jain et al., 2021), onde a exploração excessiva dos aquíferos resultou em uma redução na produção agrícola e ameaçou a segurança alimentar.

No caso extremo de sobreexploração dos mananciais subterrâneos, além do esgotamento do aquífero, ocorrerão consequências nos recursos hídricos superficiais, incluindo a diminuição do fluxo e até o secamento de nascentes e córregos, principalmente em períodos prolongados de seca na região do Cerrado.

A determinação dos volumes que podem ser retirados dos aquíferos sem prejudicar os sistemas naturais não é uma tarefa simples e deve ser feita por especialistas (hidrogeólogos). Os volumes exploráveis geralmente estão associados às reservas renováveis, que por sua vez são maiores em aquíferos livres e vão diminuindo progressivamente com o aumento do confinamento dos aquíferos. Para avaliar esta questão, serão utilizados dois aquíferos localizados no noroeste de Minas Gerais, cobertos por vegetação típica do Cerrado, que são usados para irrigação de lavouras: o Aquífero Entre Ribeiros (Campos et al., 2022) e o Aquífero Batalha (Oliveira, 2018).

O Aquífero Batalha representa um reservatório do tipo intergranular, raso e livre, associado a areias, localizado em região elevada com médias de chuvas da ordem de 1,5 mil milímetro por ano. Portanto, a renovação anual é alta e, mesmo considerando as elevadas vazões, os níveis potenciométricos permitem uma exploração sustentável no curto e médio prazo.

O Aquífero Entre Ribeiros é classificado como fissuro-cárstico, confinado e profundo, composto por rochas calcárias com pequena dissolução e argilosas fraturadas, sotoposta a uma camada espessa de rochas argilosas. Mesmo em áreas planas com solos espessos e chuvas abundantes (cerca de 1,4 mil milímetro por ano), a disponibilidade hí-

drica deste aquífero é menor devido à limitada renovação hídrica anual (recarga), já que as águas da chuva precisam atravessar toda a camada confinante antes de chegar ao reservatório em profundidade.

Apesar do conhecimento sobre os aquíferos, cálculos de reservas hídricas subterrâneas, comportamento das chuvas e outros aspectos relacionados ao armazenamento e recarga dos aquíferos, a sustentabilidade de sua exploração, especialmente para usos que requerem grandes volumes (como a irrigação de lavouras), depende do monitoramento dos níveis potenciométricos (níveis da água no aquífero). Para isso, é necessário realizar medições periódicas dos níveis de água nos próprios poços de produção ou em poços exclusivos de monitoramento.

Lembrando que, para o monitoramento ser efetivo nos poços de produção, é necessário que os poços estejam em repouso (sem bombeamento) nas 48 horas que precedem as medições.

Para que os poços de produção possam ser utilizados como poços de medição, eles devem ser equipados com um tubo piezométrico, ou seja, um tubo de pequeno diâmetro acoplado à tubulação edutora. O tubo piezométrico funciona como uma guia para a introdução do equipamento de medição. Poços de monitoramento geralmente têm um diâmetro menor (de duas ou quatro polegadas) e são dedicados exclusivamente às medições e coleta de amostras. Poços domésticos, como cisternas, não devem ser usados para monitoramento, pois seus níveis de água variam continuamente devido à retirada da água.

Para se conhecer o aquífero e regularizar os poços (emissão de outorga de direito de uso), é fundamental que sejam realizados perfis litoestratigráficos (descrição dos materiais atravessados na perfuração), perfis construtivos (descrição da obra do poço) e testes de bombeamento/vazão. Portanto, na contratação da perfuração de um poço ou bateria de poços, é importante exigir da empresa perfuradora todos estes dados e documentos detalhados, incluindo a Anotação de Responsabilidade Técnica no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (ART/Crea).

Os perfis litoestratigráficos devem incluir uma descrição dos materiais interceptados a cada três metros de avanço da perfuração, incluindo tipos de rochas/solos, cor, tamanho dos fragmentos, velocidade de perfuração, presença de fraturas, presença de veios (quartzo ou carbonato), grau de alteração da rocha, entradas de água, trechos com desmoronamentos e outras características relevantes.

Os perfis construtivos devem apresentar informações importantes como os diâmetros de perfuração, a posição da coluna de revestimentos e filtros, a posição de colocação do pré-filtro, a profundidade de instalação da bomba, a capacidade e potência da bomba, o diâmetro do tubo edutor e demais equipamentos elétricos instalados.

Os testes de bombeamento são realizados por meio de diferentes métodos, como os contínuos (bombeamento em vazão constante) ou os escalonados (bombeamento com aumento progressivo de vazões). É importante medir a recuperação do nível de água ao final do teste, que geralmente tem duração de 24 horas para garantir que o nível volte à mesma elevação do início. É preciso destacar que o teste de vazão realizado com o compressor utilizado na perfuração não representa a vazão correta para uso do poço. O teste completo deve ser realizado com bomba submersível na fase final da conclusão da obra.

A avaliação da sustentabilidade da exploração dos aquíferos é importante não apenas do ponto de vista ambiental, mas também para garantir a sustentabilidade do investimento do usuário do poço (como agricultor ou irrigante). Em caso de escassez de água por sobreexploração de um aquífero local/regional, os usuários serão os primeiros prejudicados. Por isso, é fundamental realizar estudos específicos sobre as disponibilidades hídricas, condições de recarga e bombeamento antes da exploração dos aquíferos. O monitoramento é fundamental para garantir a confiabilidade dos estudos, já que os recursos hídricos subterrâneos apresentam incertezas sobre suas características e parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos.

7.8 Considerações finais

A região do bioma Cerrado inclui parte de grandes províncias hidrogeológicas brasileiras, além de aquíferos restritos a áreas específicas. Dentre as províncias destacam-se: Parnaíba, Paraná, Centro-Oeste (Banal e Parecis) e São Francisco (Urucuia e Areado). Entre os aquíferos de áreas isoladas com potencial para uso em sistemas agrícolas (irrigação), destacam-se: Bambuí, Entre Ribeiros e Batalha.

Na região do Cerrado, ocorrem aquíferos classificados como intergranulares, fraturados e cársticos, que podem ser livres ou confinados, de dimensões regionais ou locais.

As águas subterrâneas no bioma Cerrado são de fundamental importância para a complementação do abastecimento humano, tanto em cidades quanto em áreas rurais, e são utilizadas para irrigação de grandes lavouras, na indústria e até mesmo aproveitadas como mananciais termais para uso balneário (Campos, 2004; Almeida et al., 2006; Almeida, 2011; Junqueira, 2020).

Os recursos hídricos subterrâneos são importantes para a regulação do ciclo hidrológico na região do Cerrado, especialmente durante os períodos prolongados de seca. Nesse sentido, os aquíferos ligados a solos espessos (principalmente latossolos) são extremamente relevantes para manter as descargas da rede de cursos superficiais.

Além da função ecológica de regulação e manutenção das águas superficiais, alguns aquíferos têm grande potencial para usos consuntivos de grandes demandas, como a irrigação. É importante destacar que o uso de aquíferos para esse fim só é viável em casos específicos em que os reservatórios subterrâneos tenham simultaneamente: grandes espessuras, elevadas porosidades e condições de renovação/recarga hídrica favoráveis.

A análise da viabilidade do uso dos recursos hídricos subterrâneos e de sua sustentabilidade em longo tempo de bombeamento deve passar por estudos técnicos de caracterização dos aquíferos, estimativas

das reservas hídricas subterrâneas, entendimentos das condições de circulação e dos volumes de recarga. Além disso, a exploração das águas subterrâneas deve ser acompanhada por monitoramento contínuo dos níveis potenciométricos do aquífero submetido ao bombeamento. Este procedimento é particularmente importante para os casos em que os aquíferos são aplicados para irrigação, já que esse tipo de uso requer o maior volume de água.

Uma ação de gestão que pode ampliar a sustentabilidade dos recursos hídricos é o uso de captação mista, ou seja, uso de captações tanto de águas superficiais quanto subterrâneas (em locais em que ambos os mananciais estão disponíveis). Assim, as vazões exploradas devem ser maiores nos cursos de águas superficiais ou em barragens no período das chuvas (quando a disponibilidade é maior) e o bombeamento dos poços deve ser aumentado no período de seca. Também é possível avaliar o regime de chuvas no período hidrológico anterior e, em anos de chuvas abaixo da média histórica, reduzir os volumes bombeados para minimizar as pressões sobre os aquíferos e evitar sua sobreexploração.

A recarga gerenciada ou artificial dos aquíferos é uma técnica importante para mitigar os problemas e melhorar a sustentabilidade no uso das águas subterrâneas. A recarga gerenciada ocorre a partir de técnicas conhecidas há mais de 60 anos e utilizadas em muitos países, como EUA, Índia, China, Alemanha, Itália, Austrália, entre outros (Dillon et al., 2019). No Brasil, o seu uso ainda é incipiente e tem sido aplicado apenas em pesquisas acadêmicas e em ações isoladas (Cadamuro; Campos, 2005; Montenegro et al., 2005; Almeida, 2011; Azevedo, 2012; Nunes, 2016).

A recarga gerenciada consiste na injeção planejada de água em um aquífero, usando estruturas dimensionadas para esse fim. Para evitar contaminações, a água injetada deve ter qualidade igual ou superior à água do aquífero que recebe a recarga.

Entre os impactos da exploração inadequada dos aquíferos utilizados para irrigação, destacam-se: (i) o rebaixamento exagerado dos

níveis de água do aquífero, que em casos extremos pode secar poços, e o reservatório subterrâneo; (ii) o secamento de veredas, lagos, nascentes e cursos de água superficiais (principalmente aqueles com conexão hidráulica entre aquíferos e rios); (iii) recalques ou afundamentos da superfície do terreno, especialmente em locais com geologia composta por rochas calcárias; e (iv) contaminação das águas subterrâneas, decorrente da má qualidade construtiva dos poços e de inversões de fluxo pelo rebaixamento.

7.9 Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucuia**: proposição de modelo de gestão integrada compartilhada: resumo executivo. Brasília, DF, 2017. 100 p.
- ALLEY, W. M.; REILLY, T. E., FRANKE, O. L. **Sustainability of ground-water resources**. Denver, Colorado: U.S. Government Printing Office, 1999. 86 p. (U.S. Geological Survey Circular 1186).
- ALMEIDA, L. **Estudo da aplicabilidade de técnicas de recarga artificial para a sustentabilidade das águas termais da região de Caldas Novas-GO**. 2011. 153 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- ALMEIDA, L. de; RESENDE, L.; RODRIGUES, A. P.; CAMPOS, J. E. G. **Hidrogeologia do Estado de Goiás**. Goiânia: Secretaria de Indústria e Comércio de Goiás. Superintendência de Geologia e Mineração, 2006. 231 p. (Série Geologia e Mineração, 1).
- APPELO, C. A. J.; POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1993. 536 p.
- ARAÚJO, J. B.; CARNEIRO, R. G. **Planície do Araguaia, reconhecimento geológico-geofísico**. Belém: Petrobrás/Renor, 1977. 11 p. Relatório Técnico.
- ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Hydrogeology of the Mercosul Aquifer System in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget Aquifer System, USA. **Hidrogeology Journal**, v. 7, p. 317-336, 1999.
- ARRAES, T. M. **Proposição de critérios e métodos para delimitação de bacias hidrogeológicas**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

- ARRAES, T. M.; CAMPOS, J. E. G. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 1, p. 81-89, 2007.
- BHATTARAI, N.; POLLACK, A.; LOBELL, B. D.; FISHMAN, R.; SINGH, B.; DAR, A.; JAIN, M. The impact of groundwater depletion on agricultural production in India. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 8, 085003, 2021.
- BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Edição dos Autores, 2004. 214 p.
- CADAMURO, A. L. M.; CAMPOS, J. E. G. Recarga artificial de aquíferos fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 1, p. 89-98, 2005.
- CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Revista Brasileira de Geociências**, n. 34, v. 1, p. 41-48, 2004.
- CAMPOS, J. E. G.; TELES, L. S. B.; MACHADO, A. M. A.; RODRIGUES, D. S. Caracterização do Aquífero entre Ribeiros, Município de Paracatu, Noroeste do estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 22., 2022, São Paulo. **Resumos...** São Paulo: ABAS, 2022.
- COSTA, W. D. Uso e Gestão de Água Subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM/REFO: LABHID-UFPE, 2000. p. 341-367.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo** (Escala 1: 1.000.000. Sistema de Informações Geográficas-SIG; Programa Geologia do Brasil – PGB). Brasília, DF, 2010.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 4 jul. 2022.
- CUTRIM, A. O.; SALOMÃO, F. X. T.; LUZ, J. A. G. Avaliação da vulnerabilidade à poluição da água subterrânea urbana, usando o método SI em Rondonópolis, Mato Grosso, Brasil. **Geociências**, v. 40, p. 195-205, 2021.
- DILLON, P.; STUYFZAND, P.; GRISCHEK, T.; LLURIA, M.; PYNE, R. D. G.; JAIN, R. C.; BEAR, J.; SCHWARZ, J.; WANG, W.; FERNANDEZ, E.; STEFAN, C.; PETTENATI, M.; VAN DER GUN, J.; SPRENGER, C.; MASSMANN, G.; SCALON, B. R.; XANKE, J.; JOKELA P.; ZHENG, Y.; ROSSETTO, R.; SHAMRUKH, M.; PAVELIC, P.; MURRAY, E.; ROSS, A.; BONILLA VALVERDE, J. P.; PALMA NAVA, A.; ANSEMS, N.; HA, K.; MARTIN, R.; SAPIANO, M. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 27, p. 1-30, 2019.

FEITOSA, A. C. F.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. (coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. 812 p.

FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. O Vale do Gurgueia: uma zona estratégica de produção de água subterrânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 18., 2012, Bonito. **Anais...** Bonito: ABAS, 2012.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4. ed. New York: MacMillan College, 2004. 619 p.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New York: Prentice Hall, 1979. 604 p.

GALLOWAY, D. L.; JONES, D. R.; INGEBRITSEN, S. E. (ed). **Land subsidence in the United States**. Denver: U.S. Geological Survey, 1999. 177 p. (Circular, 1182).

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, S. S.; MARCELLINI, L. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil**: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. [São Paulo]: Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/e7d9e125-7b22-4706-915b-a397f8a91784/2928658.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

IBGE. **Mapa de Solos do Brasil, 1:250.000**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://geoportal.cprm.gov.br/pronasolos/>. Acesso em: 15 abr. 2021.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil, Períodos de 1961-1990 e de 1991**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 17 out. 2022.

JAIN, M.; FISHMAN, R.; MONDAL, P.; GALFORD, G. L.; BHATTARAI, N.; NAEEM, S.; LALL, U.; DEFRIES, R. S. Groundwater depletion will reduce cropping intensity in India. **Science Advances**, v. 7, n. 9, 2021. DOI:10.1126/sciadv.abd2849.

JUNQUEIRA, T. P. **Modelo conceitual das águas termais da região da Chapada dos Veadeiros (GO)**: estudos estruturais, hidroquímicos e isotópicos. 2020. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geociências)- Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.

KONIKOW, L. F. Long-term groundwater depletion in the United States. **Ground Water**, v. 53, n. 1, p. 2-9, 2015. DOI:10.1111/gwat.12306.

LACERDA FILHO, J. V.; REZENDE, A.; SILVA, A. **Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal**: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal. Goiânia: CPRM, 1999. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

MONTENEGRO, S. G.; MONTENEGRO, A. A.; CAVALCANTI, G. L.; MOURA, A. E. S. Recarga artificial de aquíferos com águas pluviais em meio urbano como alternativa para a recuperação dos níveis potenciométricos: estudo de caso na planície do Recife (PE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO E MANEJO DE ÁGUA DE CHUVA, 5., 2005, Teresina. **Anais...** Feira de Santana: ABCMAC, 2005. 10 p.

NUNES, M. D. X. **Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no Distrito Federal**. 2016. 75 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

OLIVEIRA, G. N. R.; CAMPOS, J. E. G.; GOMES, A. W.; MOURA, F. G. Caracterização hidrodinâmica do Aquífero Batalha na Região Noroeste de Minas Gerais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 36700, 2021.

OLIVEIRA, L. A. **O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão**. 2002. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

OLIVEIRA, L. A. **O Sistema Aquífero Guarani no estado de Goiás: distribuição, caracterização hidrodinâmica, hidroquímica, composição isotópica e CFCs**. 20009. 188 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, DF.

PRANDI, E. C. **Gestão integrada das águas das unidades estratigráficas do Aquífero Bauru nas Bacias dos Rios Aguapeí e Peixe**. 2010. 192 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

QIU, J. China faces up to groundwater crisis. **Nature**, v. 466, n. 308, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/466308a>.

SILVA, A. J. P.; LOPES, R. C.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. **Bacias Sedimentares Paleozoicas e Meso-Cenozoicas Interiores**. Brasília, DF: CPRM, 2003. 31 p.

SILVA, T. M. G. **Caracterização do Sistema Aquífero Parecis na região Centro-Norte do estado de Mato Grosso: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SOUSA, E. M. D. **Arcabouço estrutural da porção sul da Bacia do Bananal e reativações Transbrasilianas**. 2017. 89 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

USGS. **Ground water and surface water: a single resource**. Denver: U.S. Geological Survey, 1998. 79 p. (Report 1139 Circular). DOI: 10.3133/cir1139.