

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL E SUA INSERÇÃO NA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS

José Luiz Gomes Zoby¹ & Bolivar Matos²

Resumo. Este trabalho apresenta um panorama das águas subterrâneas no país, adicionando a esta abordagem a concepção da bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento de recursos hídricos. Foram utilizados os dados disponíveis no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da CPRM, a cartografia disponível e as informações de recursos hídricos mais recentes. Apesar das generalizações necessárias a um trabalho nessa escala, é apresentado um levantamento do conhecimento dos aquíferos regionais de maior importância para o desenvolvimento sócio-econômico do país. O modelo de gerenciamento previsto pela Lei 9.433 estabelece que a bacia hidrográfica deverá ser a unidade territorial de gestão. Ainda prevalece no meio técnico uma visão dissociada entre o planejamento e o gerenciamento das águas superficiais e subterrâneas. Este trabalho buscou aproximar estes dois pontos de vista através de uma integração da bacia hidrográfica com as províncias hidrogeológicas do país. Esta abordagem representa uma primeira etapa na direção do planejamento integrado dos recursos hídricos.

Abstract. This work presents an overview of the groundwater in Brazil, adding the idea that the watershed is the water resources management unit. Although the necessary generalizations due to the work scale, we show the available information for the most important regional aquifers, in terms of social and economic development in the country.

Palavras-chave. águas subterrâneas, aquíferos regionais, gerenciamento, Brasil.

INTRODUÇÃO

A Lei 9.433/97 - que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - representa o marco jurídico para a concepção de uma nova forma de pensar o aproveitamento dos recursos hídricos, a partir de uma visão sustentável, considerando a administração descentralizada e a participação da sociedade civil.

Apesar do significativo avanço que representou a criação da lei e da crescente visão da importância dos recursos hídricos para a sociedade, o enfoque do gerenciamento da água, sob o

¹ Agência Nacional de Águas – Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco L, Sala 245, 70.610-200, Brasília – DF; jlgzoby@ana.gov.br; fone: 61 445-5336; fax: 61 445-5331

² Agência Nacional de Águas – Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco L, Sala 219, 70.610-200, Brasília – DF; bolivar@ana.gov.br; fone: 61 445-5346; fax: 61 445-5331

aspecto jurídico e institucional, tem se voltado tradicionalmente para as águas superficiais. As águas subterrâneas, ainda permanecem menos visíveis, claro, uma condição intrínseca delas. No Brasil, ainda existe uma lacuna na forma de pensar a gestão da água, o grande desafio é desenvolver uma visão integrada, em que para efetivamente gerir recursos hídricos, as suas diferentes formas de ocorrência não sejam dissociadas. Contemplar apenas uma parte da questão das águas, além de uma simplificação do problema, representará uma limitação na efetiva solução dos problemas que a sociedade exige.

A Constituição Federal de 1988 considera as águas subterrâneas como bens do estado. Essa concepção poderá ser alterada por Emenda de Projeto de Lei que tramita atualmente no Senado Federal, e propõe, que da mesma forma como acontece com as águas superficiais, os aquíferos compartilhados por mais de um estado sejam de domínio federal. Na verdade, independente da dominialidade das águas subterrâneas, o modelo de gestão de recursos, nos níveis federal e estadual, adota a bacia hidrográfica como unidade de planejamento de recursos hídricos. Embora seja reconhecido que os aquíferos se estendem além dos limites físicos de uma bacia, está consolidado que a bacia hidrográfica é a célula unitária para gestão dos recursos hídricos no país. O horizonte que se apresenta indica que no futuro a gestão da água deverá necessariamente compatibilizar a integração das águas superficiais e subterrâneas ao planejamento por bacias hidrográficas.

São poucos os trabalhos que permitem uma visão ampla da água subterrânea no Brasil. A divisão do país em 10 províncias hidrogeológicas foi inicialmente proposta pelo Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM em 1983, que realizou a primeira caracterização geral dos mais importantes sistemas aquíferos do país. REBOUÇAS em 1988 faz uma síntese das informações disponíveis sobre estes aquíferos. Os trabalhos publicados nesta escala posteriormente são essencialmente compilações das informações publicadas nestes dois trabalhos.

Este trabalho apresenta um panorama das águas subterrâneas no país, adicionando a esta abordagem a concepção da bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento de recursos hídricos. Foram utilizadas informações dos bancos de dados nacionais de poços da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM e do DNPM, a cartografia disponível e as informações de recursos hídricos mais recentes. Apesar das generalizações necessárias a um trabalho nessa escala, é apresentado um levantamento do conhecimento dos aquíferos regionais de maior importância sócio-econômica para o país.

ÁREA DE ESTUDO

Aspectos Gerais

O Brasil é um país de dimensões continentais, com uma área de 8.574.761 km², que abriga uma grande diversidade de climas, geologia e relevos. A população brasileira é de 169.590.693 habitantes, dos quais 18,8 % está concentrada em área urbana [1].

Cerca de 92% do país está situado na zona de clima tropical, apresentando ainda a norte e sul respectivamente, os climas equatorial e temperado. Com exceção da região do semi-árido nordestino, que recebe precipitações anuais da ordem de 700 mm, a precipitação se situa entre 1.000 e 3.000 mm.

Regiões hidrográficas

O Brasil pode ser dividido em 12 regiões hidrográficas. São elas: Amazonas, Tocantins, Parnaíba, São Francisco, Paraná, Paraguai, Uruguai, Costeiras do Norte, Costeiras do Nordeste Ocidental, Costeiras do Nordeste Oriental, Costeiras do Sudeste e Costeiras do Sul (Figura 1).

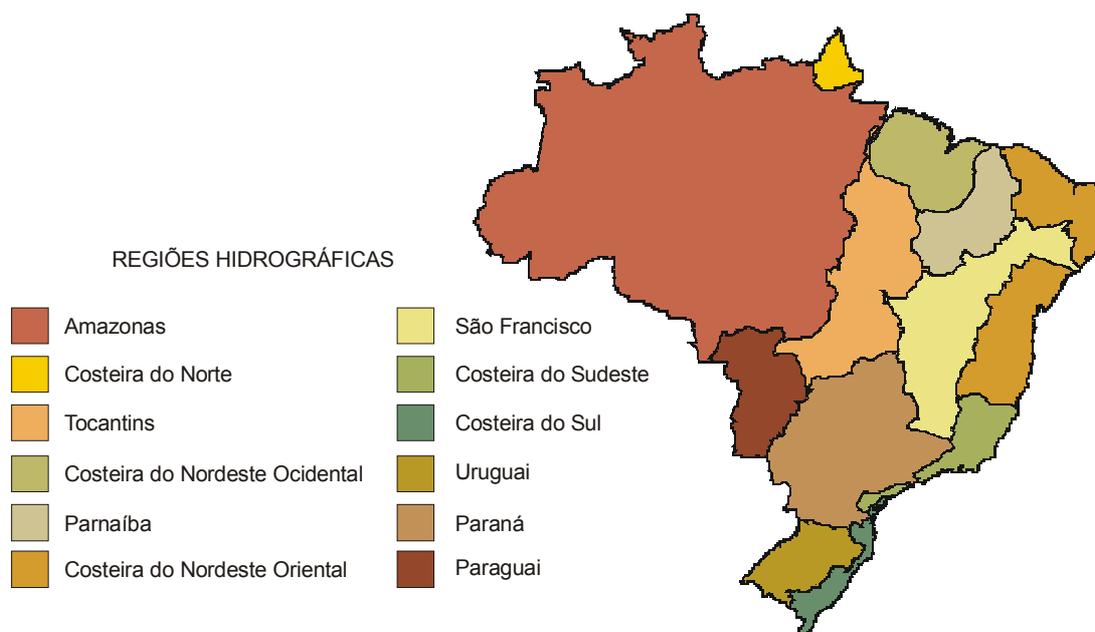


Figura 1. Regiões hidrográficas do Brasil.

Disponibilidade hídrica

A produção hídrica média anual dos rios em território brasileiro é da ordem de 182.600 m³/s, com uma disponibilidade de 33.900 m³/hab.ano [2]. Levando-se em consideração a vazão produzida na área da região Amazônica que se encontra em território estrangeiro, estimada em 89.000 m³/s, essa disponibilidade hídrica total atinge valores da ordem de 272.000 m³/s.

Entretanto, se sabe que no país a água está distribuída de forma irregular devido às condições fisiográficas e climatológicas do país. Verifica-se que mais de 70% dos recursos hídricos

superficiais estão na região amazônica, 47% do território nacional. Áreas pobres em recursos hídricos são observadas na região Costeiras do Nordeste Oriental, nas bacias do rio Capibaribe, Pernambuco, com 428 m³/hab.ano, do rio Inhambupe, na Bahia e Sergipe, com 479 m³/hab.ano e do rio Vaza Barris, Bahia, com 610 m³/hab.ano. A níveis mais agregados, na mesma região, observam-se valores de 740 m³/hab.ano para a região Oriental Pernambuco, de 886 m³/hab.ano para a Oriental Paraíba, de 1.024 m³/hab.ano para as regiões do Leste Potiguar, Rio Grande do Norte e de 1.165 m³/hab.ano para a bacia do rio de Contas, na Bahia. Um quadro de baixa disponibilidade, mas associado a uma concentração populacional elevada, é, também, observado na bacia do rio Tietê, região do Paraná, com 810 m³/hab.ano, no Sudeste do Brasil, Estado de São Paulo [2].

A falta de políticas de gerenciamento de recursos hídricos, associada à cultura de desperdício e descaso ambiental, permitiu o surgimento de conflitos de uso da água e a degradação ambiental dos mananciais. Este cenário que se instalou ao longo dos últimos anos provocou uma alteração no conceito de riqueza hídrica, que passa então a ser necessariamente avaliada dentro de uma perspectiva de planejamento ao longo prazo e sustentabilidade. A água subterrânea, dentro dessa nova concepção de gerenciamento de recurso hídrico, deve ser avaliada sob o ponto de vista da integração com as águas superficiais, e considerando a sua importância como recurso estratégico para o país, como manancial que precisa ser protegido e que apresenta potencial de ofertar água com qualidade e quantidade.

Águas subterrâneas

A água subterrânea vem sendo utilizada desde o início da colonização do país, quando na expansão para o interior, com o aproveitamento de coberturas inconsolidadas, principalmente aluviões, era captada através de cacimbões ou poços rasos. A sua participação foi decisiva no abastecimento da população e do rebanho da região semi-árida nordestina. Os primeiros poços no país foram perfurados por uma empresa americana em Fortaleza, nos anos de 1845-1846, e apresentavam profundidade de 150 m.

Atualmente no Brasil, 15,6 % dos domicílios utilizam exclusivamente a água subterrânea de poços ou nascentes, 77,8 % possuem rede de abastecimento de água e 6,6 % usam outras formas de abastecimento [3]. É importante destacar que entre os 77,8% de domicílios que possuem rede de abastecimento de água uma parte significativa usa água subterrânea que está conectada ao sistema de abastecimento de água da população.

A água subterrânea desempenha importante papel no desenvolvimento socioeconômico do país. Ela participa do abastecimento de comunidades rurais do semi-árido nordestino, da população urbana de diversas cidades do país, como Fortaleza, Recife, Maceió, Ribeirão Preto, entre outras, e irrigação em Mossoró no Rio Grande do Norte, por exemplo. Na Região Metropolitana de São

Paulo a água subterrânea é utilizada em hospitais, indústrias e hotéis. É ainda responsável pelo turismo através das águas termais em cidades como Caldas Nova em Goiás, Araxá e Poços de Caldas em Minas Gerais. A água mineral atualmente é amplamente usada pelas populações dos centros urbanos pela sua imagem de garantia de qualidade. Estes são alguns exemplos da importante participação da água subterrânea nos diversos usos. No país, fatores importantes desencadeadores do aumento do uso das águas subterrâneas foram a crescente oferta de energia elétrica e a poluição das fontes hídricas de superfície [4].

Na falta de um cadastro nacional de poços, estimar a quantidade de poços existentes no Brasil e a quantidade perfurada anualmente se torna bastante difícil. Se considerarmos que no ano de 1988 existiam 200.000 poços e 10.000 eram perfurados anualmente [5], haveria atualmente no país cerca de 340.000 poços. Apesar de não haver dados anuais sobre a perfuração de poços, se levarmos em consideração o significativo aumento no número de empresas de perfuração de poços nos últimos anos, seria uma estimativa bastante razoável que o número de poços construídos anualmente no país esteja por volta de 13.000 e o total de poços existentes seja, pelo menos, 400.000.

O Brasil ainda apresenta uma deficiência séria no conhecimento do potencial hídrico de seus aquíferos e do seu atual estágio de exploração. Os estudos regionais são poucos e encontram-se defasados. Para exemplificar, o mais completo estudo hidrogeológico de caracterização regional de aquíferos no Brasil foi realizado no Nordeste no período de 1965 a 1975 pela SUDENE, e constituiu o “Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste”. Desde então praticamente nada foi feito em escala regional para a região. Merece destaque ainda dentro do contexto nacional, o “Estudos das águas subterrâneas” das Regiões Administrativas do Estado de São Paulo, que foi realizado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, no período de 1972 a 1983. Mais recentemente, a identificação de aquíferos contaminados tem estimulado o desenvolvimento de estudos de detalhe em áreas freqüentemente pequenas.

Este quadro reflete claramente a falta de políticas públicas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. A carência de estudos hidrogeológicos no país também reflete, de certa forma, as densidades demográficas e os graus de escassez das águas superficiais em relação às demandas impostas pela população e atividades econômicas, assim é que os maiores níveis de informação estão concentrados, em especial, nos domínios metropolitanos [6].

Faltam, portanto, para o planejamento e gerenciamento efetivo dos recursos hídricos, levantamentos básicos de hidrogeologia que possam fornecer subsídios para a tomada de decisões das autoridades competentes. O ponto de partida para a gestão das águas subterrâneas deve considerar um cadastro de pontos de captação para formação de um banco de dados, que será o instrumento essencial para a realização dos estudos hidrogeológicos e para a outorga do uso da água subterrânea.

Províncias hidrogeológicas

O Brasil está totalmente inserido na Plataforma Sul-Americana, que está estruturada sobre um embasamento composto por rochas metamórficas de idade arqueana associadas a unidades proterozóicas, representadas por faixas de dobramentos com metassedimentos e metavulcânicas associadas. Sobre este embasamento, a partir do Ordoviciano-Siluriano, se desenvolveram coberturas sedimentares e vulcânicas que preencheram três extensas bacias: Amazonas, Parnaíba e Paraná [7].

A interação das condições climáticas e geológicas permitiu a divisão do país em 10 Províncias Hidrogeológicas. São elas: Escudo Setentrional, Amazonas, Escudo Central, Parnaíba, São Francisco, Escudo Oriental (Nordeste e Sudeste), Paraná, Escudo Meridional, Centro-Oeste e Costeira. A Figura 4 mostra as províncias hidrogeológicas e a localização esquemática dos principais sistemas aquíferos.

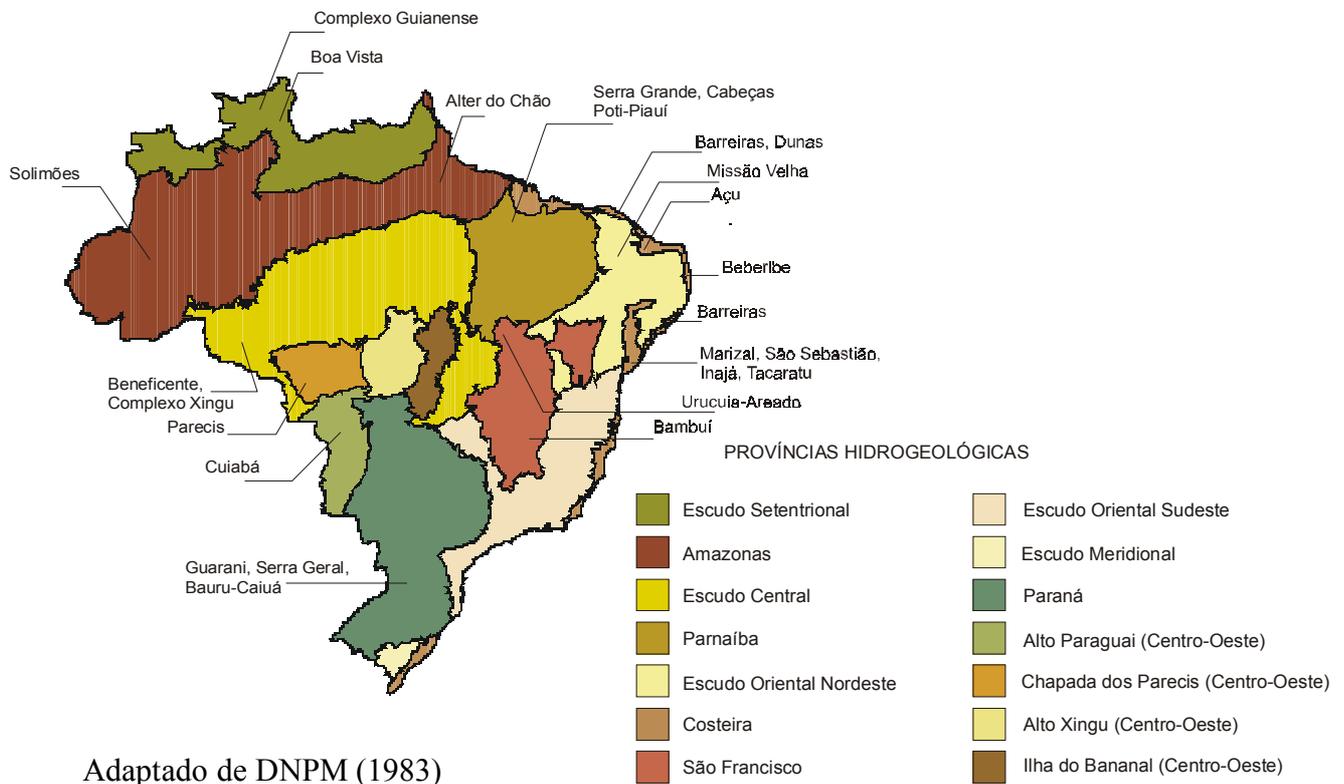


Figura 2. Províncias hidrogeológicas e principais sistemas aquíferos do Brasil.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi constituído de: levantamento de informações existentes, com consulta a bancos de dados meteorológico, hidrológico e hidrogeológico; digitalização de mapas; construção de isoietas; análise e interpretação dos dados.

O levantamento de informações existentes teve como principais instrumentos o Panorama das Regiões Hidrográficas no Brasil [2], o Mapa Hidrogeológico do Brasil (Escala 1:5.00.000) [8], o Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos operado pela Agência Nacional de Águas, o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da CPRM e Sistema de Informações Sondagens Hidrogeológicas (SISON) do DNPM.

As províncias hidrogeológicas do país foram digitalizadas, tendo por base o Mapa Hidrogeológico do Brasil (Escala 1:5.00.000). A análise e sobreposição de bases foram realizadas através do Sistema de Informações Geográficas - Arc View GIS 3.2 (Environmental Systems Research Institute - ESRI, 1999).

O mapa de isoietas foi construído através da krigagem de normais de 30 anos de chuva em todo o país em 204 estações pluviométricas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. A precipitação média \bar{P} em cada província hidrogeológica foi determinada de

$$\bar{P} = \frac{\sum A_i P_i}{\sum A_i}, \text{ onde } A_i \text{ é a área entre duas isoietas e } P_i \text{ é a precipitação média correspondente.}$$

As informações sobre os poços (vazão, profundidade e uso da água) foram obtidas do SIAGAS e o SISON. Na apresentação dos resultados foram usados valores médios, com exceção da capacidade específica dos poços em aquíferos fraturados, em que se adotou a mediana como valor mais representativo da grandeza em função da grande variabilidade de valores. Foi calculado o desvio padrão das vazões dos poços a fim de fornecer uma idéia sobre o intervalo de variação dos valores. Os dados hidrodinâmicos dos sistemas aquíferos (condutividade hidráulica e armazenamento) foram obtidos na literatura.

Neste trabalho, o Brasil foi dividido nas 12 regiões hidrográficas utilizadas pela Agência Nacional de Águas nas suas atividades de planejamento e gestão dos recursos hídricos [2]. A fim de obter uma melhor compreensão da inserção dos aquíferos dentro das regiões hidrográficas, foi adotada a classificação dos sistemas aquíferos agrupados em 10 províncias hidrogeológicas [8].

RESULTADOS

A Figura 5 mostra as regiões hidrográficas brasileiras sobrepostas às 10 províncias hidrogeológicas, mais as isoietas em mm. Como observamos na figura, os limites das 12 regiões hidrográficas citadas não são necessariamente coincidentes com os das províncias hidrogeológicas.

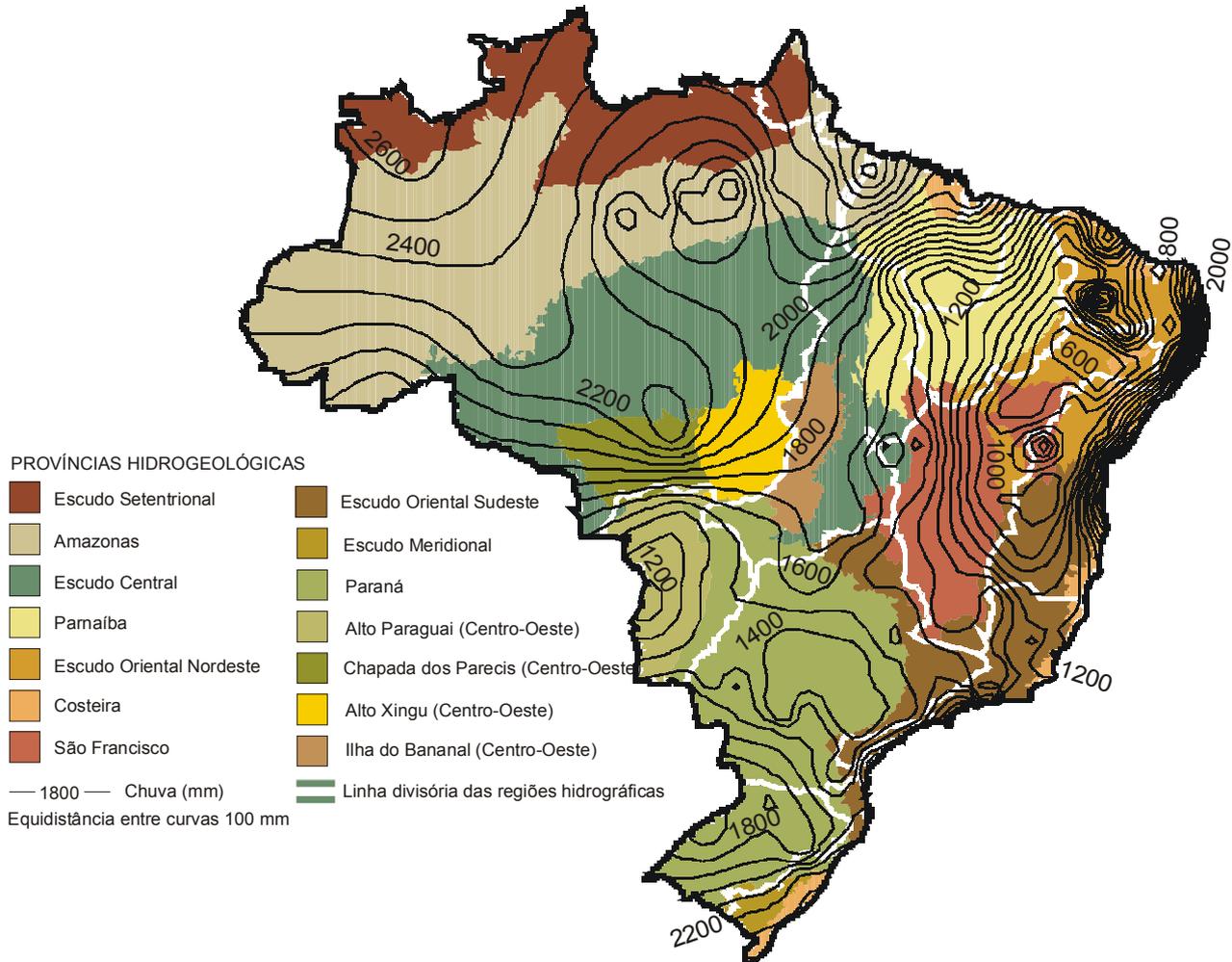


Figura 5. Regiões hidrográficas, províncias hidrogeológicas e isoietas.

A Tabela 1 mostra as 12 regiões hidrográficas brasileiras e as 10 províncias hidrogeológicas contidas em cada região hidrográfica, com as áreas correspondentes, a população (Censo 2000), precipitação média anual (mm), a vazão média (m^3/s), evaporação (mm). A precipitação média foi determinada a partir de um mapa de isoietas construído com as normais de 30 anos de chuva em todo o país. A evaporação foi estimada a partir do balanço hídrico. É apresentada a seguir uma caracterização dos principais sistemas aquíferos de cada província hidrogeológica.

Tabela 1. Características das regiões hidrográficas e províncias hidrogeológicas no país.

REGIÃO HIDROGRÁFICA	PROVÍNCIA HIDROGEOLÓGICA	ÁREA (km ²)	%	População (hab)	Precipitação (mm)	Vazão (m ³ /s)	Evaporação (mm)
Amazonas	Amazonas	1.794.966	45	7.575.333	2.236	134.119	1.424
	Escudo Central	1.116.868	28				
	Escudo Setentrional	678.098	17				
	Centro-Oeste	398.881	10				
	Total	3.988.813	100				
Costeiras do Norte	Escudo Setentrional	73.937	75	59.466	2.448	3.253	1.407
	Amazonas	24.646	25				
	Total	98.583	100				
Costeiras do Nordeste Occidental	Parnaíba	163.903	64	4.908.161	1.726	1.695	1.517
	Amazonas	56.342	22				
	Costeira	30.732	12				
	Escudo Central	5.122	2				
	Total	256.098	100				
Tocantins	Escudo Central	325.510	43	7.788.166	1.721	11.306	1.250
	Centro-Oeste	158.970	21				
	Parnaíba	143.830	19				
	Paraná	83.270	11				
	São Francisco	37.850	5				
	Amazonas	7.570	1				
	Total	757.000	100				
Parnaíba	Parnaíba	285.726	83	3.586.739	1.111	1.272	994
	Escudo Oriental do Nordeste	48.195	14				
	São Francisco	10.327	3				
	Total	344.248	100				
Costeiras do Nordeste Oriental	Escudo Oriental do Nordeste	322.092	47	33.355.989	1.082	2.937	947
	Escudo Oriental do Sudeste	219.297	32				
	Costeira	109.648	16				
	São Francisco	34.265	4				
	Total	685.303	100				
São Francisco	São Francisco	412.800	64	14.161.434	1.036	2.850	897
	Escudo Oriental do Nordeste	154.800	24				
	Escudo Oriental do Sudeste	45.150	7				
	Escudo Central	19.350	3				
	Costeira	12.900	2				
	Total	645.000	100				
Costeiras do Sudeste	Escudo Oriental do Sudeste	190.190	91	26.225.376	1.345	3.868	761
	Costeira	18.810	9				
	Total	209.000	100				
Paraná	Paraná	651.183	76	54.575.194	1.509	11.000	1.104
	Escudo Oriental do Sudeste	188.500	22				
	São Francisco	17.136	2				
	Total	856.820	100				
Paraguai	Centro-Oeste	254.514	70	1.839.050	1.396	1.340	1.280
	Paraná	109.078	30				
	Total	363.592	100				
Uruguai	Paraná	172.169	97	3.829.292	1.784	4.150	1.047
	Escudo Meridional	5.325	3				
	Total	177.494	100				
Costeiras do Sul	Escudo Meridional	59.771	31	11.686.493	1.590	4.843	798
	Costeira	46.274	24				
	Paraná	44.346	23				
	Escudo Oriental do Sudeste	42.418	22				
	Total	192.810	100				

Província Escudo Setentrional

São escassas as informações sobre os aquíferos da região. Predominam na região as rochas metamórficas e ígneas de idade pré-cambriana que formam aquíferos fraturados. No Complexo Guianense os poços apresentam vazão média de 5 m³/h e profundidade média de 58 m. São importantes na região os sedimentos quaternários do sistema aquífero Boa Vista, que são utilizados para abastecimento da população de Boa Vista. A profundidade média dos poços é de 36 m e as vazões são elevadas, com média de 33 m³/h e capacidade específica de 1,82 m³/h/m (Tabela 2).

Tabela 2. Características dos principais sistemas aquíferos da Província Escudo Setentrional.

Sistema Aquífero	Tipo de Aquífero	Litologia	Parâmetros Hidráulicos dos Poços				Poços consultados
			Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Espec. (m ³ /h/m)	
Complexo Guianense	Fraturado	Gnaisses, anfíbolitos, granulitos, migmatitos e rochas granitóides	58	5	4	0,06*	6
Boa Vista	Livre	Areias, concreções lateríticas e níveis conglomeráticos	36	33	23	1,82**	9

*: mediana. **: média.

Província Amazonas

A Bacia sedimentar do Amazonas é formada por uma seqüência de sedimentos de idade paleozóica e mesozóica, que chega a 7.000 m de espessura. Estes sedimentos são recobertos por sedimentos terciários com espessura média em torno de 600 m.

A captação de água na província está concentrada nos sedimentos cretácico-terciários da formação Alter do Chão, e terciários das formações Solimões e Pirabas (Tabela 3). A exploração dos aquíferos da região ocorre principalmente nas principais áreas urbanas, e os poços apresentam, em geral, elevada produtividade. A captação de água é realizada através de poços tubulares, sistemas de ponteiros. Os poços do tipo amazonas que apresentam grande diâmetro (1 a 2 m) e profundidades normalmente entre 3 e 10 m captam água dos aquíferos colúvio-aluvionares.

O sistema aquífero Alter do Chão é explorado na região de Manaus sendo utilizado para abastecimento humano e industrial. Os poços apresentam profundidade média de 133 m e vazão média elevada, de 54 m³/h. O sistema aquífero Solimões é utilizado para abastecimento humano nas cidades de Rio Branco e Porto Velho. Os poços possuem vazão e profundidades médias, respectivamente de 54 m³/h e 56 m. O aquífero Pirabas, constituído basicamente por rochas calcárias, é explotado principalmente na cidade de Belém através de poços com profundidade média de 220 m. A vazão média (135 m³/h) e a capacidade específica (11,81 m³/h/m) são elevadas. O principal uso da água é para abastecimento da população.

Tabela 3. Características dos principais sistemas aquíferos da Província Amazônica.

Sistema Aquífero	Tipo de Aquífero	Litologia	Parâmetros Hidráulicos dos Poços				Poços consultados
			Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Espec. média (m ³ /h/m)	
Solimões	Poroso e Livre	Argilitos e bancos de arenitos	56	27	21	3,06	36
Alter do Chão	Poroso e Livre	Arenitos argilosos e argilitos	133	54	65	1,89	145
Pirabas	Cárstico	Calcários e argilas	220	135	97	11,81	32

Província Escudo Central

Predominam na região as rochas cristalinas do Pré-Cambriano, que tendem a formar aquíferos fraturados. A informação hidrogeológica sobre a província é limitada, tendo sido identificados dois sistemas aquíferos fraturados associados ao Complexo Xingu e os metassedimentos do Grupo Beneficente com semelhanças grandes quanto à produtividade dos poços (Tabela 4). A profundidade média deles se situa em torno de 85 m e as vazões por volta de 11 m³/h. O aquífero Beneficente é utilizado para abastecimento humano e o Complexo Guianense apresenta usos industrial e humano.

Para a província dispõe-se de alguns dados de produtividade dos aluviões que são importantes no abastecimento de populações ribeirinhas. Este aquífero apresenta poços com elevadas vazões e capacidade específica (Tabela 4).

Tabela 4. Características dos principais sistemas aquíferos da Província Escudo Central.

Sistema Aquífero	Tipo de Aquífero	Litologia	Parâmetros Hidráulicos dos Poços				Poços consultados
			Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Espec. (m ³ /h/m)	
Complexo Xingu	Fraturado	Gnaisses, anfibolitos, granulitos, migmatitos e rochas granitóides	82	11	11	0,23*	60
Beneficente	Fraturado	Metassedimentos detríticos	87	12	9	0,50*	8
Aluvião	Livre	Areia fina a média e níveis arenos-siltosos	27	23	181	13,03**	5

*: mediana. **: média.

Província Parnaíba

A Bacia Sedimentar do Parnaíba compreende um pacote de sedimentos que atinge 3.000 m de espessura depositados entre o Cambriano e o Cretáceo. Na província hidrogeológica são reconhecidos três importantes sistemas aquíferos com extensão regional, denominados de Cabeças (Devoniano), Serra Grande (Siluriano) e Poti-Piauí (Carbonífero), que são explorados principalmente no estado do Piauí (Tabela 5). As águas destes aquíferos apresentam são, em geral, de boa qualidade química, porém com risco de salinização para o interior da bacia [9]. Estes aquíferos são explorados sob condições livres e confinadas. Os poços mais profundos, que chegam a atingir 650 m, apresentam, em geral, maiores vazões específicas e exploram a porção confinada destes aquíferos, sendo que em alguns locais ocorrem condições de artesianismo.

Tabela 5. Características dos principais sistemas aquíferos da Província Parnaíba.

Sistema Aquífero	Tipo de aquífero	Litologia	Espessura média (m) ¹	Parâmetros Hidráulicos dos Poços					Parâmetros Hidrodinâmicos ¹	
				Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Espec. média (m ³ /h/m)	Poços consultados	K* (m/s)	S**
Itapecuru	Livre	Arenitos finos a grossos com níveis de argilitos e siltitos argilosos	100	91	12	13	1,86	116	3,8.10 ⁻⁶	1,3.10 ⁻¹
Corda	Livre	Arenitos médios a conglomeráticos	160	98	14	15	2,12	36	---	---
	Confinado			208	15	11	3,27	50	2,0.10 ⁻⁵	4,0.10 ⁻⁶
Motuca	Livre	Arenitos finos a médios	130	96	18	22	3,11	26	3,6.10 ⁻⁶	2,0.10 ⁻⁴
Poti-Piauí	Livre	Arenitos finos a médios com níveis de folhelhos e siltitos	400	140	18	27	1,39	49	1,7.10 ⁻⁵	0,002
	Confinado			226	40	35	2,58	10	---	---
Cabeças	Livre	Arenitos finos a grossos com níveis de siltitos e folhelhos	300	109	12	20	1,77	87	---	---
	Confinado			284	50	62	8,18	34	5,4.10 ⁻⁵	3,7.10 ⁻⁴
Serra Grande	Livre	Arenitos finos a médios com níveis conglomeráticos	500	158	6	17	0,44	72	---	---
	Confinado			172	15	14	2,41	110	1,0.10 ⁻⁵	4,3.10 ⁻⁴

*K-conductividade hidráulica; **S- armazenamento; ¹- Dados obtidos em [10]

No estado do Maranhão devido às condições geomorfológicas com topografias elevadas, a captação dos três sistemas aquíferos principais se torna problemática [9]. Por isso, nessa região são explorados os aquíferos mais rasos Motuca, Corda e Itapecuru, em geral, sob condições livres. A profundidade média dos poços nestes sistemas aquíferos fica em torno de 95 m com vazão média da ordem de 16 m³/h. O aquífero Itapecuru apresenta a maior extensão em superfície, sendo explorado na cidade de São Luís e no interior do estado do Maranhão, em que desempenha importante papel no abastecimento de populações rurais e de animais.

A água subterrânea representa a principal fonte de abastecimento das populações dos estados do Piauí e Maranhão, em especial nas regiões do interior de clima semi-árido em que os rios são praticamente todos intermitentes. No Maranhão, mais de 70 % das cidades usam água de poços, e no estado do Piauí este percentual supera 80 %.

Província Escudo Oriental

Esta província é formada essencialmente por rochas cristalinas com uma grande diversidade litológica, que inclui gnaisses, xistos, filitos, granitos, quartzitos de idade pré-cambriana. Os aquíferos são do tipo fraturado, a produtividade e profundidade dos poços são fortemente influenciadas pelo clima. A província Escudo Oriental é dividida em duas sub-provínias (Tabela 6).

A sub-província Escudo Oriental Nordeste se situa, na maior parte, na região de clima-semi-árido do Nordeste, com precipitação anual em torno de 800 mm. Sobre as rochas cristalinas desta região se desenvolve um delgado manto de intemperismo com espessura variando entre 3 e 5 m. A produtividade dos poços na região é baixa, com média de 2,0 m³/h, e são freqüentes os problemas de elevada salinidade das águas, com sólidos totais dissolvidos variando entre 1.000 e 35.000 mg/L. Os poços são também rasos com profundidade média de 51 m. A falta de critérios de locação de poços e de programas de manutenção das obras de captação torna muito elevada a quantidade de poços abandonados e desativados nesta área, que chega em alguns estados do nordeste representar mais de 30 % dos poços existentes.

Na área cristalina do Nordeste, ocorrem algumas bacias sedimentares interiores que apresentam importância no abastecimento de algumas cidades. A Chapada do Araripe se destaca neste contexto pelo seu potencial hidrogeológico na região do semi-árido nordestino, e corresponde à bacia do Cariri que se situa na divisa entre os estados de Pernambuco, Ceará e Piauí, e portanto não pode ser considerada como uma bacia costeira. O Missão Velha é o mais importante aquífero (Tabela 6) e apresenta poços com boas vazões que respondem pelo abastecimento das cidades do Crato e Juazeiro (CE). A região se destaca ainda pela presença de inúmeras fontes de água que são utilizadas no abastecimento público, privado e irrigação.

Tabela 6. Características da Província Escudo Oriental.

Sistema Aquífero	Tipo de aquífero	Litologia	Parâmetros Hidráulicos dos Poços				Poços consultados
			Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Específica (m ³ /h/m)	
Escudo Oriental Nordeste	Fraturado	gnaiesses, xistos, filitos, granitos, quartzitos	51	2	3	0,10*	233
Escudo Oriental Sudeste	Fraturado	gnaiesses, xistos, filitos, granitos, quartzitos	129	9	10	0,14*	254
Missão Velha (Bacia interior) (Chapada do Araripe, 11.500 km ²)	Poroso e confinado	Arenitos finos a grossos	79	14	14	2,33**	15

*: mediana. **: média.

Na sub-província Escudo Oriental Sudeste, o clima com elevada temperatura e pluviosidade favorece o desenvolvimento de um espesso manto de intemperismo (10 m de espessura, podendo ultrapassar 100 m) sobre as rochas cristalinas. A produtividade e profundidade dos poços é maior.

Nestas regiões a produtividade dos poços depende da presença de zonas fraturadas nas rochas e da conexão hidráulica com o manto de intemperismo.

Província Centro-Oeste

São escassos os dados hidrogeológicos sobre a província Centro-Oeste. Por sua ampla extensão, os sedimentos terciário-quadernários, principalmente aluviões, se destacam na região. Em função do seu papel no abastecimento urbano são importantes na província, o aquífero poroso Parecis, situado na sub-província Chapada dos Parecis, e o aquífero fraturado Cuiabá, localizado na sub-província Alto Paraguai (Tabela 7). O aquífero Cuiabá participa do abastecimento da cidade homônima e é utilizado também pelas indústrias da região. Os poços apresentam vazão média de 19 m³/h e profundidade média de 136 m. O aquífero Parecis é responsável pelo abastecimento da cidade de Vilhena (RO). Apresenta poços com alta produtividade (capacidade específica de 8,83 m³/h/m) e profundidades que variam entre 40 e 280 m.

Tabela 7. Características dos principais sistemas aquíferos da Província Centro-Oeste.

Sistema Aquífero	Tipo de Aquífero	Litologia	Espessura média (m)	Parâmetros Hidráulicos dos Poços				Poços consultados
				Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Espec. (m ³ /h/m)	
Cuiabá	Fraturado	Filitos, micaxistos e quartzitos Arenitos finos a médios, níveis conglomeráticos e lentes de argilitos e siltitos	-	136	19	24	0,57*	32
Parecis	Livre		150	102	147	94	8,83**	8

*: mediana. **: média.

Província São Francisco

A província abriga uma grande diversidade de tipos litológicos. Os sedimentos das formações Urucuia-Areado dão origem a aquíferos porosos, predominantemente livres, que são explorados principalmente nos estados de Minas Gerais, Piauí e Bahia para abastecimento humano e irrigação (Tabela 8). A profundidade média dos poços é de 89 m e a vazão média de 10 m³/h.

Associado aos metassedimentos que ocorrem na província hidrogeológica do São Francisco ocorrem aquíferos fraturados, com produtividade média dos poços de 8 m³/h. Estes metassedimentos pertencem, na maior parte, ao Grupo Bambuí, Supergrupo Espinhaço e Grupo Chapada Diamantina.

A província apresenta uma significativa área ocupada por rochas calcárias que pertencem ao Grupo Bambuí (neoproterozóico) e unidades equivalentes. As feições de fraturamento e de dissolução formam aquíferos cárstico-fissurais com produtividade média dos poços elevada, de 14 m³/h, superior àquelas obtidas apenas nos metassedimentos. Este sistema aquífero é muito explorado nas regiões de Irecê (Grupo Una, BA) e Sete Lagoas (MG).

Tabela 8. Características do principais sistemas aquíferos da Província São Francisco.

Sistema Aquífero	Tipo de Aquífero	Litologia	Espessura média (m)	Parâmetros Hidráulicos dos Poços				Poços consultados
				Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Espec. (m ³ /h/m)	
BambuÍ	Cárstico-fraturado	Metacalcários, margas, metassiltitos e metafolhelhos	-	85	14	21	0,52*	161
Metassedimentos	Fraturado	Quartzitos, filitos e metarcósios	-	85	8	9	0,19*	88
Urucuaia-Areado	Livre	Arenitos finos a médios e níveis de argilitos e e conglomerados	300	89	10	8	0,97**	28

*: mediana. **: média.

Província Costeira

Esta província compreende os sedimentos depositados na faixa litorânea do país, desde o Amapá até o Rio Grande do Sul. Os mais importantes sistemas aquíferos explotados estão localizados nas regiões norte e nordeste. A Tabela 9 apresenta as principais características destes aquíferos.

Os sistemas aquíferos Dunas e Barreiras são especialmente importantes na região costeira do estado do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte para abastecimento humano, com destaque para as cidades de Belém (PA), Fortaleza (CE) e Natal (RN). A cidade de Natal é abastecida com mais de 70 % de água subterrânea, mas atualmente apresenta áreas contaminadas por nitrato que são resultado da ausência de sistema de saneamento com a disposição dos efluentes domésticos no solo. O aquífero Açú é especialmente importante na região de Mossoró (RN) onde ele vem sendo intensamente explotado para abastecimento público, industrial e em projetos de irrigação. O aquífero Beberibe é explotado na Região Metropolitana de Recife por cerca de 2.000 poços que atendem condomínios residenciais, hospitais e escolas. O crescimento desordenado do número de poços tem provocado significativos rebaixamentos do nível de água e problemas de salinização em alguns locais. A associação do aquífero Barreiras na sub-província Costeira Alagoas/Sergipe e o aquífero Marituba é responsável pelo abastecimento da população de Maceió. Os sistemas aquíferos da sub-província Recôncavo-Tucano-Jatobá são explotados principalmente nos estados da Bahia e Pernambuco para abastecimento público. Os sistemas aquíferos Tacaratu e Inajá são utilizados também para a irrigação e o sistema aquífero São Sebastião é também importante no abastecimento industrial, especialmente na região de Camaçari (BA).

Tabela 9. Características dos principais sistemas aquíferos da Província Costeira.

Sub-Província	Principais Sistemas Aquíferos	Tipo de aquífero	Litologia	Espess. (m) ¹	Parâmetros Hidráulicos dos Poços					Parâmetros Hidrodinâmicos ¹	
					Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Espec. média (m ³ /h/m)	Poços Consult.	K*	S**
São Luiz/Barrerinhas (63.500 Km ²)	Barreiras	Poroso e livre	Arenitos siltítico-argilosos e argilitos	50 a 80	25	18	15	5,35	70	1,4.10 ⁻⁵	3,5.10 ⁻²
Ceará/Piauí	Dunas	Poroso e livre	Arenitos finos a médios e arenitos argilosos	50 a 80	38	7	5	1,77	84	---	---
	Barreiras	Poroso e livre			43	5	3	0,91	80	---	---
		Poroso e confinado			45	4	4	0,94	115	---	---
Potiguar (20.000 Km ²)	Açu	Poroso e confinado	Arenitos finos e siltítico-argilosos e níveis argilosos	200	443	37	42	1,96	20	7,5.10 ⁻⁶	1,0.10 ⁻⁴
Pernambuco/Paraíba (13.000 Km ²)	Beberibe	Poroso e confinado	Arenitos com intercalações de siltitos e argilitos	100	246	78	53	3,75	21	3,8.10 ⁻⁵	2,2.10 ⁻⁴
Alagoas/Sergipe (12.000 Km ²)	Barreiras	Poroso e livre	Arenitos siltítico-argilosos e argilitos	60 a 80	77	23	33	2,16	4	---	---
		Poroso e semi-confinado			160	103	70	4,51	11	1,4.10 ⁻⁴	3,6.10 ⁻³
Recôncavo/Tucano/Jatobá (56.000 Km ²)	Marizal	Poroso e livre	Arenitos grossos a conglomeráticos com níveis de folhelhos e calcários	200	129	21	30	2,13	43	---	---
		Poroso e confinado			141	15	10	2,00	42	---	---
	São Sebastião	Poroso e livre	Arenitos médios a grossos com níveis de argilitos e folhelhos	3.000	127	24	33	2,88	59	---	---
		Poroso e confinado			170	40	46	2,37	109	1,2.10 ⁻⁵	2,0.10 ⁻⁴
	Inajá	Poroso e livre	Arenitos finos a médios com níveis de folhelhos e siltitos	300	116	4	2	0,47	30	---	---
Tacaratu	Poroso e livre	Arenitos finos a grossos com níveis de conglomerados e folhelhos	200	102	6	4	0,86	27	---	---	

*K-conductividade hidráulica; **S- armazenamento; ¹- Dados obtidos em [10]

Província Paraná

A bacia sedimentar do Paraná possui sedimentos depositados entre o Ordoviciano e o Terciário que ultrapassam 6.500 m de espessura. Os principais sistemas aquíferos da região por sua extensão regional e potencial hídrico são o Botucatu-Pirambóia (Triássico-Jurássico), também chamado de Guarani, Serra Geral (Cretáceo) e Bauru-Caiuá (Cretáceo) (Tabela 10).

O aquífero Guarani representa cerca de 80 % do potencial hidrogeológico da província [11] e apresenta uma área estimada de 950.000 km², dos quais cerca de 90 % se encontra coberto pelos basaltos da Formação Serra Geral [5], que cria condições de confinamento e artesianismo. A profundidade dos poços da região é extremamente variável. Em condições livres a profundidade

média é de 113 m. Nos locais confinados o aquífero chega a ser explorado por poços com mais de 600 m de profundidade, que captam águas com elevada temperatura (30 a 45 °C). A produtividade do aquífero é alta, com capacidade específica média elevada (2,52 m³/h/m) e vazão média de 54 m³/h. As suas águas são utilizadas para abastecimento humano, como é o caso de Ribeirão Preto (SP), indústrias e lazer (balneários). O Serra Geral é formado por basaltos que geram aquífero do tipo fraturado. As vazões dos poços neste subsistema apresentam grande variabilidade em função dos processos de deformação estrutural responsáveis pelo fraturamento da rocha. São comuns, principalmente nas partes mais centrais da província, a ocorrência, nos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani, de concentrações de fluoreto acima do limite de potabilidade que comprometem a sua utilização para o abastecimento público. O aquífero Bauru-Caiuá ocorre recoberto o Serra Geral, sendo explorado para abastecimento público e de algumas indústrias.

Tabela 10. Características dos principais sistemas aquíferos da Província Paraná.

Sistemas Aquíferos	Tipo de aquífero	Área (km ²) ¹	Litologia	Espess. média (m)	Parâmetros Hidráulicos dos Poços					Parâmetros Hidrodinâmicos ²	
					Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. espec. média (m ³ /h/m)	Poços consult.	K*	S**
Bauru-Caiuá	Poroso e livre	315.000	Arenitos finos a médios com intercalações de argilitos e siltitos	200	131	24	17	1,34	119	10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁶	5.10 ⁻² a 15.10 ⁻²
Serra Geral	Fraturado	1.000.000	Basaltos	150	123	23	24	3,34 (mediana)	129	---	---
Guarani/Botucatu-Pirambóia	Poroso e livre	840.000	Arenitos finos a médios	250	113	13	12	0,79	52	10 ⁻² a	10 ⁻¹ a
	Poroso e confinado				263	54	59	2,52	69	10 ⁻⁵	10 ⁻³ a 10 ⁻⁶
Ponta Grossa	Poroso e livre	---	Folhelhos com intercalações de arenitos finos	300	150	6	9	0,37	9	---	---
Furnas	Poroso e livre	---	Arenitos médios a grossos	200	124	17	13	1,56	21	---	---
	Poroso e confinado				195	46	75	1,51	6	---	---

*K-condutividade hidráulica; **S- armazenamento

¹- Dados obtidos em [5]; ²Valores apenas indicativos da ordem de grandeza obtidos em [11]

Nas regiões de borda da província hidrogeológica do Paraná são explorados os aquíferos Furnas (Devoniano) e Ponta Grossa (Devoniano), que ocorrem nestes locais predominantemente sob condições livres. Apesar do menor potencial hidrogeológico eles apresentam vazões médias razoáveis, entre 6 e 17 m³/h. A exploração destes aquíferos nas porções mais centrais da província é dificultada pelas elevadas profundidades necessárias para os poços e pelo risco de águas salinizadas.

Província Escudo Meridional

Esta província está localizada no extremo sul do país e apresenta rochas cristalinas que formam aquíferos fraturados (Tabela 11). A vazão média dos poços é de 8 m³/h e a profundidade média de 83 m. A água tem como usos principais o humano e subordinadamente, o industrial concentrado na região de Porto Alegre.

Tabela 11. Característica dos principais sistemas aquíferos da Província Escudo Meridional.

Sistema Aquífero	Litologia	Parâmetros Hidráulicos dos Poços				Poços consultados
		Prof. média (m)	Vazão média (m ³ /h)	Desvio padrão Vazão	Capac. Específica mediana (m ³ /h/m)	
Cristalino Sul	Gnaise, migmatitos, filitos, xistos e rochas granitóides	83	8	12	0,12	32

CONCLUSÕES

O conceito de desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos deverá considerar a gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. O modelo de gerenciamento previsto pela Lei 9.433 estabelece que a bacia hidrográfica deverá ser a unidade territorial de gestão. Ainda prevalece no meio técnico uma visão dissociada entre o planejamento e o gerenciamento das águas superficiais e subterrâneas. Este trabalho buscou aproximar estes dois pontos de vista através de uma integração da bacia hidrográfica com as províncias hidrogeológicas do país. Esta abordagem representa uma primeira etapa na direção do planejamento integrado dos recursos hídricos.

São ainda escassos os estudos regionais de aquíferos no país em função, principalmente, da ausência de programas governamentais de longo prazo para o setor e da disponibilidade de informações hidrogeológicas. O aprimoramento do conhecimento do comportamento hidrodinâmico dos aquíferos e das reservas suas hídricas, primeira etapa para o planejamento dos recursos hídricos subterrâneos, exige a criação de bancos de dados que forneçam subsídios para estudos hidrogeológicos em diversas escalas e para a realização da outorga de direito de uso da água, instrumento fundamental de gerenciamento do recurso hídrico previsto na Lei 9.433. A caracterização dos principais sistemas aquíferos apresentada para cada província hidrogeológica visou sintetizar as principais informações disponíveis sobre o assunto dentro da escala de trabalho proposta.

Apesar do modelo de aproveitamento de recursos hídricos historicamente se concentrar nas águas superficiais, as informações levantadas indicam que a água subterrânea apresenta atualmente um importante papel socioeconômico no país pelo potencial hídrico de vários sistemas aquíferos e pela qualidade das suas águas. A visão do aproveitamento da água subterrânea apenas de forma complementar ao abastecimento por águas superficiais atualmente é apenas parcialmente

verdadeira. A água subterrânea apresenta atualmente usos múltiplos em várias regiões do país, e inclui aproveitamentos na irrigação, indústria e lazer.

AGRADECIMENTOS

À Agência Nacional de Águas (ANA), ao Superintendente de Planejamento da ANA, João Gilberto Lotufo Conejo, e aos colegas João Augusto Burnett, Marcelo Costa, Nelson Freitas, Nilo Nunes, Osman Silva, Raimundo Lima Filho.

REFERÊNCIAS

- [1] IBGE (2000) *Censo demográfico 2000: resultados preliminares*. Rio de Janeiro, 156 p.
- [2] ANA (2002) *A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília, 64 p.
- [3] IBGE (2000) *Pesquisa nacional de saneamento básico, 2000*. SEDU/PR. CD-ROM.
- [4] LEAL, A.S. As águas subterrâneas no Brasil. Ocorrências, disponibilidades e usos. In: O Estado das Águas no Brasil. Brasília, ANEEL. CD-ROM. (Série Estudos e Informações Hidrológicas e Energéticas. ÁGUA)
- [5] REBOUÇAS, A.C. (1988). Groundwater in Brazil. *Episodes*, 11(3):209-214.
- [6] REBOUÇAS, A.C. (1999). Águas Subterrâneas. In: REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (eds.) *Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. São Paulo, Escrituras Editora. p. 117-150.
- [7] SCHOBENHAUS, C. & CAMPOS, D.A. (1984) A evolução da plataforma sul-americana e suas principais concentrações minerais. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. (coords.). *Geologia do Brasil*. Brasília, DNPM. p. 9-53.
- [8] DNPM (1983) *Mapa hidrogeológico do Brasil*. (Escala: 1:5.000.000).
- [9] MENTE, A. (1997) As condições hidrogeológicas do Brasil. In: FEITOSA, F.A. & MANOEL FILHO, J. (coord.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza, CPRM, LABHID-UFPE. p. 323-340.
- [10] COSTA, W.D. Água subterrânea e o desenvolvimento sustentável do semi-árido nordestino. In: Projeto ÁRIDAS. Brasília, Secretaria de Planejamento, Orçamento e Coordenação da Presidência da República. 53 p. (GT II – Recursos Hídricos)
- [11] REBOUÇAS, A.C. (1980) Potencial hidrogeológico da Bacia do Paraná – Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1. Recife, 1980. *Anais*. Recife, ABAS, p. 35-47.