

# SISTEMAS AQUÍFEROS BRASILEIROS: O VERDADEIRO SIGNIFICADO HIDROGEOLÓGICO.

*José do Patrocínio Tomaz Albuquerque<sup>1\*</sup> & Janiro Costa Rêgo<sup>1</sup>*

**Resumo** – Este artigo define o que é, verdadeiramente, um sistema aquífero e apresenta as suas implicações na gestão integrada dos recursos hídricos, ditos superficiais e subterrâneos. Mostra que a integração entre estes recursos se faz através do escoamento entre sistemas componentes do ciclo hidrológico. Esta abordagem por sistema permite definir, com maior segurança, as relações entre sistemas aquíferos e sistemas hidrográficos e, conseqüentemente, a estimativa do aqui denominado potencialidade ou potencial de água subterrânea, seja em termos de sistema aquífero, seja em termos sistema/bacia hidrográfica, a unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos (Lei 9.433/1997). Permite também saber que os limites de retirada de água subterrânea para atendimento de demandas socioeconômicas (disponibilidades) devem ser inferiores às potencialidades do sistema aquífero.

**Palavras-chave** – Sistemas, escoamento, gestão.

## BRAZILIAN AQUIFER SYSTEMS: THE TRUE HYDROGEOLOGIC MEANING

**Abstract** – This paper defines the true aquifer system and shows your implications on integrated management water resources, named surface water and groundwater. It shows that the integration is made through flow between these resources, components of the hydrologic cycle. This treatment by aquifer system allows define, with more insurance, the relation between aquifer system and river basin and. consequently, the assessment of the named potentiality or potential of groundwater, by aquifer system or by basin, the planning and assessment unity of management of the water resources (Law 9.433/1.997). The system aquifer allows also to know the safe yield of groundwater to satisfy the socioeconomic demands (availability) must be smaller the potentiality aquifer system.

**Keywords** – Systems, flows, management.

## INTRODUÇÃO

O termo sistema tem sido empregado, inadvertidamente, referindo-se, ora a uma formação, ora a um complexo de rochas, ora a um tipo de porosidade ou de litologia, ora a uma ou mais unidades aquíferas, quase sempre analisadas isoladamente. É o que foi executado e apresentado em diversos trabalhos pela ANA, como, por exemplo, o que contém o mapa mostrado na Figura 1. Por esta figura cada aquífero, representado por sua área de recarga, corresponde a um sistema, destacado do contexto da bacia sedimentar onde se insere, apresentando um comportamento hidrogeológico isolado, dissociado dos demais aquíferos a ele sobrepostos e sotopostos em cada bacia sedimentar respectiva.

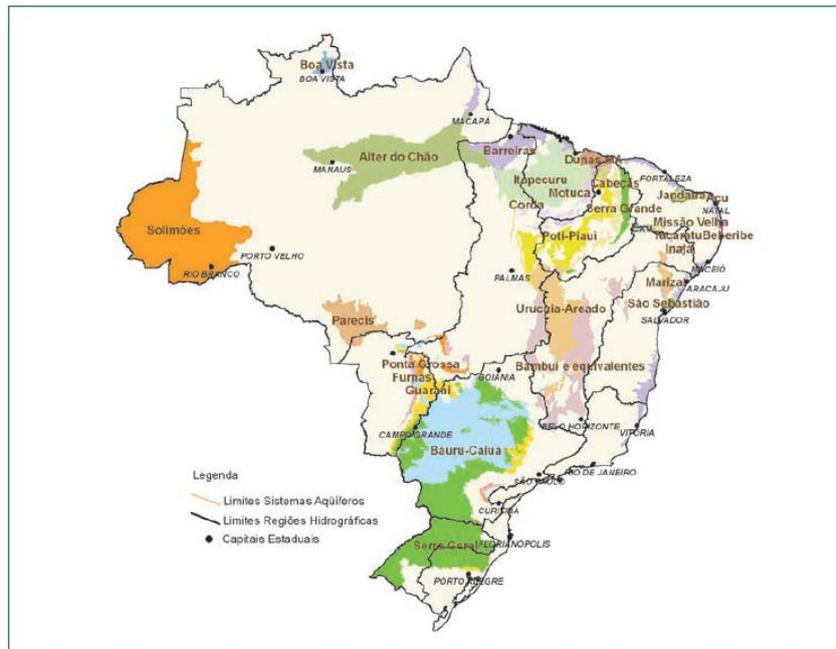


Figura 1- Os sistemas aquíferos segundo a ANA (2005).

Na realidade, cada um dos aquíferos destacados na Fig. 1 insere-se no contexto geológico (lito-estratigráfico, estrutural e geotectônico) do conjunto de formações que compõem a bacia sedimentar que, quase totalmente saturada, tem seus aquíferos, hidráulicamente, conectados constituindo, assim, conjuntamente com aquíferos e aquíferos, um sistema aquífero. Este conceito foi introduzido pelo PLIRHINE - Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil (1980) e aperfeiçoado por Albuquerque (2004 e 2007), sendo o sistema aquífero definido como “uma estrutura hidrogeológica organizada, bem delimitada, o qual se relaciona com o meio exterior representado pelos sistemas meteorológico, hidrográfico e oceanográfico, todos componentes do ciclo hidrológico”.

O conceito em apreço incorpora os princípios modernos de avaliação dos recursos de água subterrânea: o escoamento e a subdivisão hidrogeológico-estrutural. Sobre este último princípio, o item 3.3 do capítulo 3 “Modern Concepts of Groundwater Resources of the Earth” (Dzhamalov & Zektser, 2004) registra o seguinte: “Em estudos hidrogeológicos regionais, há, basicamente, dois caminhos diferentes para a subdivisão (hidrogeológica) regional: o que subdivide separadamente áreas de águas subterrâneas em não confinadas e confinadas; e o que parte da ideia de uma única hidrosfera subterrânea, onde se consideram as águas contidas em aquíferos, livres e “sob pressão”, conjuntamente. Presentemente, a maioria dos hidrogeólogos prefere a segunda alternativa, fundamentada na sistematização desse conjunto de aquíferos em suas condições naturais, relacionados pelo escoamento. Os outros fatores (clima, topografia, hidrografia, etc.) são igualmente levados em consideração porque os reservatórios, tendo uma estrutura geológica similar, podem estar em várias zonas climáticas ou ter uma feição geomorfológica ou uma rede da drenagem diferente, que determinará a posição do divisor de drenagem da água subterrânea”. As avaliações desenvolvidas no presente trabalho encaixam-se no segundo caso, de abordagem das águas subterrâneas de forma conjunta e associada, consubstanciadas na expressão “sistema aquífero. Assim, os principais sistemas aquíferos brasileiros correspondem e têm a mesma denominação da gama de bacias sedimentares, constantes da Fig. 2, adiante apresentada. Ter-se-ão, por exemplo, os Sistemas Aquíferos do Acre, Solimões, Amazonas, Paraná, do Parnaíba, Potiguar, e assim por diante..

Estes sistemas aquíferos brasileiros, definidos segundo os princípios ora adotados (comportamento hidrogeológico regional das rochas, subdivisão hidrogeológico/estrutural e escoamento), colocam em posições diametralmente opostas as águas subterrâneas acumuladas e em circulação (esta, ínfima ou nula) nas rochas ígneas e metamórficas constituintes do Complexo Cristalino Pré-Cambriano e aquelas armazenadas e em circulação, geralmente profusa e significativa nas rochas sedimentares, integrantes das bacias sedimentares brasileiras. Tais bacias correspondem às suas porções emersas, dos tipos sinéclises (fanerozóicas) e rifts interiores, de idades Meso-Cenozóicas, além de bacias sedimentares Proterozóicas/Paleozóicas e Proterozóicas/Mesozóicas, com seus limites regionalmente impermeáveis (escudos de rochas ígneas e metamórficas que compõem a área cratônica da parte brasileira da Plataforma Sul-Americana), adjacentes e subjacentes a estas bacias.

### **O CASO DO CRISTALINO**

O Cristalino, representado geotectonicamente na Fig.2 pela cor rosa, por sua permeabilidade insignificante ou nula, tem o comportamento de um aquífugo continental. Ele pode ser dividido em vários aquífugos regionais, tendo por base, a localização geográfica de seus Escudos e de exposições isoladas e menores do embasamento. Assim sendo, temos os aquífugos regionais das Guianas, Brasil Central e Atlântico. Este comportamento regional resulta das condições de origem destas rochas que as tornaram, primariamente, pouco porosas e de insignificante ou nenhuma permeabilidade. Porém, devido ao fato de terem sido afetadas por eventos tectônicos rígidos e não tectônicos posteriores podem formar, localmente, zonas aquíferas, instaladas em suas áreas fraturadas ou falhadas e/ou alteradas fisicoquimicamente. Neste sentido, o Cristalino pode, também, constituir um sistema aquífero: o Sistema Aquífero Cristalino Pré-Cambriano. Este sistema apresenta características hidrogeológicas próprias, com suas zonas aquíferas espacialmente descontínuas, localizadas, heterogêneas, anisotrópicas, e de comportamento hidrogeológico caótico, lotérico, imprevisível em termos de armazenamento e circulação (o que pode ser inferido pela incerteza e aleatoriedade da produção de seus poços) e, geralmente, inabordável pela hidrogeologia clássica. Contrariamente ao que é possível ocorrer com os sistemas aquíferos sedimentares, não há possibilidade de conexões hidrológicas e hidráulicas entre as zonas aquíferas constituintes do Sistema Cristalino, separadas que são por blocos absolutamente impermeáveis, lateralmente e em profundidade. No entanto, devido às diferenciações geotectônicas e, principalmente, geográficas entre as suas regiões, com ênfase para a hidroclimatologia, este sistema pode ser abordado em consonância com a localização geográfica dos seus escudos. Assim, teremos o Sistema Cristalino das Guianas, do Brasil Central e do Atlântico. Este último Sistema, poderia ser subdividido, em função de sua geologia e hidroclimatologia diferenciadas em Sistema Cristalino do Atlântico Oriental (até os limites do Estado de Minas Gerais com São Paulo) e Sistema Cristalino do Atlântico Meridional (o restante).

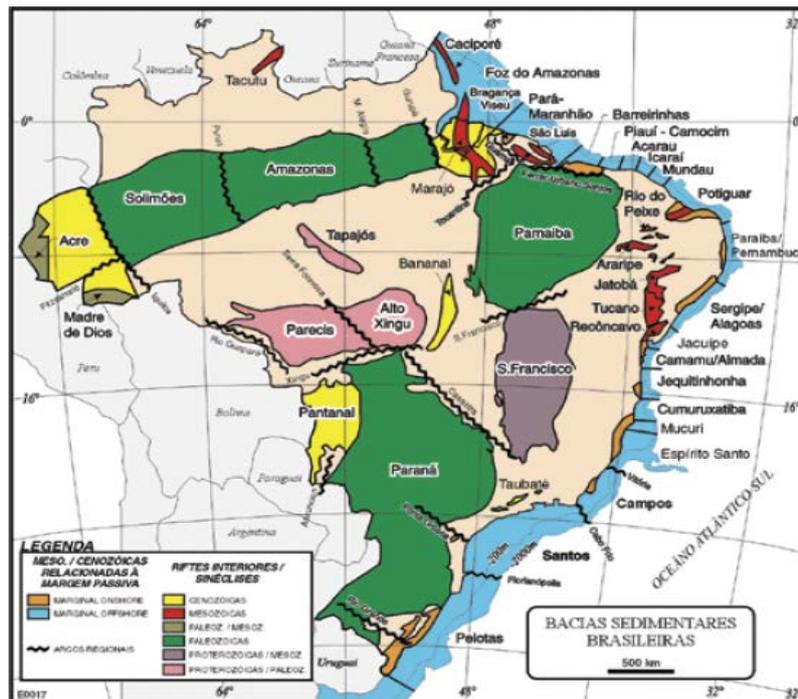


Fig. 2- Bacias Sedimentares e Escudos/ Sistemas Aquíferos do Brasil.  
 Fonte: Geologia do Continente Sul-Americano, Cap. XXXIII, p. 596.

## COMPOSIÇÃO DE SISTEMAS AQUÍFEROS

Um sistema, conforme aqui conceituado, inserido em bacia sedimentar, em seu caso mais completo, pode ser composto de dois subsistemas, um livre e um “sob pressão”, hidráulicamente inter-relacionados.

Seus subsistemas podem estar contidos em uma ou mais formações geológicas, constituindo um contexto aquífero que apresenta condições intrínsecas de armazenamento e de recarga, circulação e descarga.

O subsistema livre, inserido ou não, em mais de uma formação geológica, parcial ou totalmente saturada, apresenta **uma superfície hidrostática, determinada pelo lugar geométrico dos pontos submetidos à pressão atmosférica local, constituindo uma única unidade aquífera.**

Os subsistemas do tipo “sob pressão”, confinados ou semiconfinados, se constituídos por mais de uma unidade aquífera (que podem estar contidas em uma formação, um membro de formação ou, mesmo, em um conjunto de camadas de uma formação, ou até em um conjunto de duas ou mais formações), apresentam tantas superfícies piezométricas quantas forem estas unidades aquíferas, semiconfinadas ou confinadas. Neste subsistema sob pressão podem coexistir aquíferos totalmente confinados, sotopostos ou sobrepostos aos semiconfinados.

Um sistema, formado pela conjunção de subsistemas livre e semiconfinado apresenta **uma única superfície hidrostática, de extensão regional, proveniente da contribuição, por fluxo vertical ascendente de uma resultante superfície piezométrica, formada pela participação de cada aquífero do subsistema “sob pressão” ao subsistema livre, definidoras da superfície hidrostática resultante do sistema.** Esta superfície hidrostática regional tem cargas hidráulicas maiores que teria a superfície hidrostática do subsistema livre, visto isoladamente.

Um sistema e suas relações com os sistemas meteorológico, hidrográfico e oceanográfico pode ser representado, esquematicamente, pela Fig. 3, a seguir:

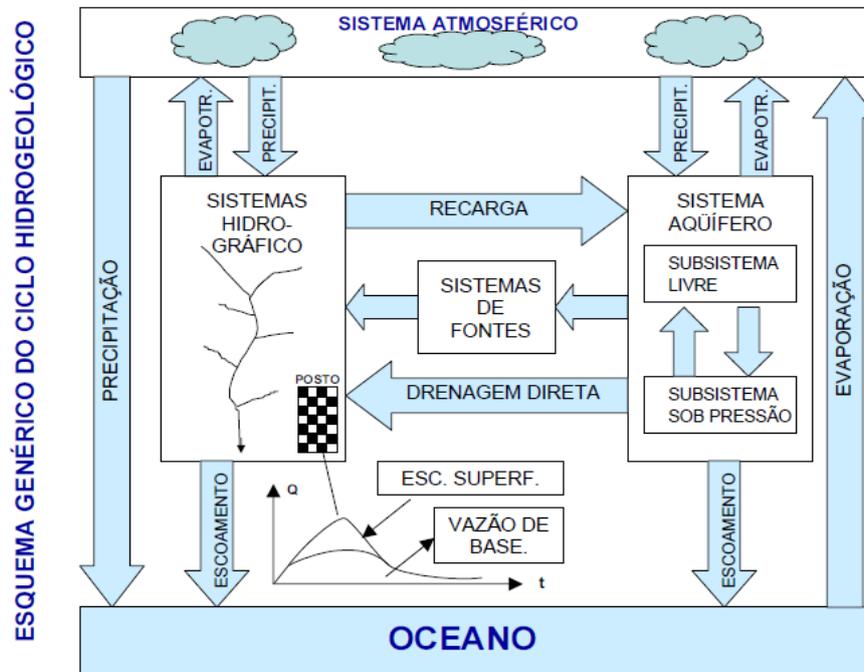


Fig. 3- Visão sistêmica do ciclo hidrológico, mostrando as relações hidráulicas e hidrológicas intrasistema aquífero e deste com os demais sistemas componentes do ciclo.

Fonte: Albuquerque, 2004 e 2007.

## OS ESCOAMENTOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NOS E PARA FORA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS

No subsistema semiconfinado ocorrem fluxos em cada aquífero, além de fluxos entre eles, naturalmente ascendentes, partindo do aquífero mais inferior e chegando ao mais superior do sistema, determinado pela magnitude de suas cargas hidráulicas, maiores nos mais inferiores e menores nos mais superiores aquíferos do subsistema “sob pressão”.

Se o subsistema sob pressão for exclusivamente do tipo confinado, somente ocorre o fluxo em cada aquífero integrante do subsistema. Neste caso, suas respectivas superfícies piezométricas se dispõem separadamente, guardando certo paralelismo entre elas, definindo um escoamento independente em cada unidade aquífera, até o exutório final, geralmente, os oceanos. Tais superfícies piezométricas começam a se formar a partir do ponto em que o peso das camadas superiores começa a exercer a ação de compressão sobre o aquífero subjacente. Elas (as superfícies piezométricas) são responsáveis pelo acréscimo do volume armazenado e escoado no sistema, do que resulta a sua já referida e única superfície hidrostática.

Um sistema aquífero, por outro lado, em suas relações externas, pode ter suas águas repartidas entre as várias bacias hidrográficas a ele sobrepostas ou compor, junto com outros sistemas, os recursos de água subterrânea de uma bacia hidrográfica. Como exemplo do primeiro caso temos os sistemas aquíferos litorâneos brasileiros e, do segundo caso, os diversos sistemas aquíferos adjacentes e subjacentes à bacia hidrográfica do rio Amazonas.

No caso do subsistema livre (que inclui as áreas de recarga de aquíferos sob pressão, confinados e semiconfinados) esta relação é concretizada diretamente através do fluxo das águas subterrâneas descarregadas na rede hidrográfica de cada bacia.

Já no subsistema sob pressão (semiconfinado), a relação com o sistema hidrográfico é processada indiretamente, por meio do fluxo ascendente que alimenta o subsistema livre que, por sua vez, descarrega a resultante destes fluxos nos cursos d'água da bacia, constituindo o seu escoamento de base. Este escoamento de base total, medido na foz do rio principal é admitido, em média de longo prazo, igual à recarga processada na área de afloramento do subsistema livre e do subsistema sob pressão.

Destas considerações infere-se, também, porque a bacia hidrográfica deve ser considerada, no caso das águas subterrâneas, a unidade de gestão dos recursos hídricos, juntamente com o outro componente destes recursos, o denominado escoamento superficial direto, imediatamente consequente à ocorrência dos eventos pluviométricos.

Dentro deste contexto sistêmico, uma mesma formação geológica pode participar de mais de um sistema aquífero, sendo estes sistemas separados por um divisor de água subterrânea, um acidente meramente hidráulico.

Por outro lado, uma mesma formação aquífera pode ser parte integrante de um sistema ou de um subsistema aquífero e, também, constituir um sistema independente. É o caso, por exemplo, das formações aluviais que, quando se sobrepõem ou se justapõem a outras unidades aquíferas, perdem a sua individualidade hidrogeológica, a elas se associando, compondo um subsistema livre de tal forma que, poços captando este reservatório, ao serem explorados, têm seus cones expandidos para além dos limites da unidade aquífera. Mas, estas formações aluviais, quando são embasadas e limitadas lateralmente por rochas impermeáveis, como são as ígneas e metamórficas, formam um sistema individualizado, com suas condições intrínsecas de armazenamento, recarga, circulação e descarga.

A Figura 4 procura traduzir, de uma forma simplificada, um sistema aquífero, as relações entre seus subsistemas, assim como as suas conexões com os sistemas meteorológico, hidrográfico e oceanográfico. No caso, por hipótese, admite-se que o subsistema sob pressão é do tipo semiconfinado, com carga piezométrica superior à carga hidráulica do subsistema livre.

Dentro desta configuração de cargas hidráulicas, de divisores de águas subterrâneas (coincidentes, no estado natural, com os interflúvios de cursos d'água superficiais), o padrão de fluxo de água subterrânea resultante é o apresentado na Figura 4. Nela, fica patente o comando do escoamento extra-sistema aquífero pelos drenos naturais de suas águas, os rios e o mar, obedecendo as suas condições de cargas hidráulicas, comuns a uma mesma superfície piezométrica (isopieza), aqui representada por seu traço (linha).



**subterrânea do Sistema.** Fica claro, que uma exploração da potencialidade resultará em mudança no regime de fluxo de cursos d'água perenes. Como o princípio utilizado na avaliação das águas subterrâneas de um sistema aquífero é o escoamento de base, a potencialidade de água subterrânea de um sistema aquífero é, nos sistemas interiores (sem conexão direta com o mar), dada pela vazão de base de longo período e, nos sistemas aquíferos costeiros por esta, acrescida da vazão do escoamento natural subsuperficial descarregada no oceano.

## CONCLUSÕES

Ressalta do exposto as seguintes conclusões: 1- a expressão sistema aquífero aplicada corretamente deve se referir ao conjunto de aquíferos, aquíferos, aquíferos e, até, aquíferos integrantes de bacias sedimentares; 2- no caso do Cristalino, o sistema corresponde ao conjunto de zonas aquíferas que o formam; 3- a gestão integrada entre os sistemas, hidrográficos e aquífero, se faz através do escoamento de base fluvial, suprido por todo o sistema aquífero; 4- a potencialidade de água subterrânea de um sistema aquífero (ou, simplesmente, potencial) é dada pela média de longo período desse fluxo de base; 5- finalmente, que a disponibilidade de um sistema aquífero é a parcela do potencialidade que pode ser explorada para satisfação de demandas socioeconômicas, devendo-se preservar uma parcela das mesmas para atendimento da demanda ecológica.

## REFERÊNCIAS

- Albuquerque, J. P. T.; Rego, J.C., 1998.** Conceitos e definições para Avaliação e Gerenciamento Conjunto de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos. In Anais do IV Simpósio dos Recursos Hídricos do Nordeste, Campina Grande – PB.
- Albuquerque, J. P. T., 2004.** Sustentabilidade de Aquíferos. In Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste e Livro de Resumos, São Luís – MA.
- Albuquerque, J. P. T., 2007.** Água Subterrânea no Planeta Água. In Estudos Geológicos. V. 17 (1), Recife, Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociência, Ed. Bagaço, 2007, p. 23-39.
- ANA- Agência Nacional de Águas, 2005,** Cadernos de Recursos Hídricos, Disponibilidades e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil, Brasília, DF.
- BRASIL/ Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. MMA, 2006.** Plano Nacional de Recursos Hídricos. Panorama e estado dos recursos hídricos do Brasil - Volume 1, Brasília, DF.
- BRASIL/SUDENE, 1980.** Plano de Aproveitamento Integrado dos Recursos Hídricos do Nordeste do Brasil – Fase I. Recursos Hídricos I, Águas Subterrâneas, Volume VII, Recife-PE.
- Dzhamalov & Zektser, 2004.** Modern Concepts of Groundwater Resources of the Earth. In Groundwater Resources of the World and their Uses, Cap. 3, p. 35-58, ISBN 92-9220-007-0, UNESCO, Paris-França.
- Feitosa, E. C. et al., 2008.** Avaliação de Recursos Hídricos Subterrâneos. In Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, CPRM : LABHID, Rio de Janeiro, p.661-671.
- Zalán, P. V., 2004.** Evolução Fanerozóica das Bacias Sedimentares Brasileiras. In Geologia do Continente Sul-Americano, Cap. XXXIII, p. 595-614, São Paulo – SP.