

Geosistemas e recursos hídricos: água subterrânea no estado da Bahia

*Olivar A. L. de Lima**

Resumo

Neste trabalho são revisados alguns aspectos conceituais da circulação da água na Terra nas escalas global, regional e local. Também são destacadas as modificações introduzidas pelo acelerado crescimento das populações e de suas atividades no planeta. Uma regra básica de conservação é proposta como critério para harmonizar as necessidades do desenvolvimento com saudáveis condições ambientais. Com base em características morfoclimáticas, o estado da Bahia é dividido em três regiões principais: costeira, semi-árida e chapadas. São ainda resumidas as condições hidrológicas de cada região, com especial ênfase na parte subterrânea, e listados os principais problemas enfrentados na sua exploração. Algumas linhas mestras de atuação são sugeridas para implementar os estudos necessários e evitar problemas de uso e manejo inapropriados dos recursos disponíveis.

Palavras-chave: geosistemas, ciclo hidrológico, água subterrânea, geofísica, estado da Bahia.

Abstract

Some conceptual aspects on the water circulation patterns in the earth at global, regional and local scales are reviewed. The changes introduced by the explosive human growth and activities are stressed. A basic conservation rule is proposed as a useful criterion to harmonize the developmental needs with safe environmental conditions. On basis of morph climatic characteristics the Bahia state is divided into three main zones: coastal, semi-arid and high plains. The water conditions, emphasizing the groundwater aspects, in each region is reviewed along with a listing of the main problems geoscientists is facing with their exploration. Some guidelines are suggested to improve their studies and to avoid problems with their inappropriate management.

Key words: geosistem, hidrological cycle, groundwater, geophysics, estate of Bahia.

INTRODUÇÃO

Do total de água existente na litosfera terrestre, cerca de 1,39 bilhões de quilômetros cúbicos, somente 2,5% é de água doce. Da água doce, a maior parte (68,9%) está imobilizada na forma de gelo nas calotas polares e nas cadeias de montanhas continentais; do restante, cerca de 29,9% está armazenada em aquíferos no topo da litosfera; 0,9% transita na atmosfera e apenas 0,3% está disponível em rios, lagos e reservatórios superficiais com acessibilidade imediata para uso (ISC, 1999; UN, 2003). Atualmente, a disponibilidade média de água no mundo, por pessoa, é de 7.600m³/ano. Todavia, a distribuição geográfica e sazonal da água no glo-

bo não é uniforme, havendo países, como a Guiné Bissau, que dispõe de mais de 200.000m³/hab/ano e, outros, como a Nigéria, que tem menos de 3.000 m³/hab/ano. No Brasil, a disponibilidade média, estimada com base apenas nos deflúvios superficiais, é de 29.700m³/hab/ano, com uma variação, por exemplo, de 455.000m³/hab/ano, na bacia Amazônica, a 7.500m³/hab/ano, na bacia do São Francisco.

Apesar da relativa abundância de água na Terra, em muitos países a disponibilidade hídrica não está atendendo adequadamente a demanda. O problema tende a recrudescer quando se projeta que, com as taxas atuais de expansão industrial e de crescimento populacional, 1/4 da água doce disponível no planeta logo estará muito poluída para ser consumida. Nesse sentido, sabe-se que o consumo de água de má qualidade é o principal responsável pela maioria das doenças endêmicas e pela

* Doutor em Geofísica, pesquisador Sênior do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia (CPGG/UFBA), olivar@cpgg.ufba.br

elevada mortalidade infantil nos países em desenvolvimento do mundo. Dessa forma, os problemas previstos de crises no suprimento humano não estão relacionados apenas à quantidade disponível de água, mas, também, principalmente, à crescente poluição nos reservatórios das partes superiores da litosfera. Essa poluição tem aumentado com a industrialização, com a utilização de produtos químicos na agricultura, com as deficiências no saneamento urbano e com os níveis de conforto das atuais conveniências sociais. Este cenário enfatiza a necessidade de obter-se, o quanto antes, não só o conhecimento real das reservas hídricas utilizáveis, mas, também, dos aspectos do gerenciamento, proteção, monitoramento e tratamento dos efeitos nocivos da poluição do solo e da água.

Outra questão, intimamente relacionada, diz respeito aos procedimentos que a sociedade humana tem adotado para usufruir os recursos do planeta. Em geral, ao longo da história, o homem tem utilizado a Terra com pouco planejamento e, via de regra, com uma visão excessivamente imediatista. Até há pouco tempo atrás, as questões do desenvolvimento eram tratadas por meio de análises simplistas orientadas para alcançar um máximo de desempenho/benefício, com um mínimo de custos envolvidos. Por causa da explosão populacional e do desenvolvimento tecnológico, hoje prospera uma consciência mais conservativa, que preconiza se poder alcançar os mesmos objetivos, preservando ao máximo as peculiaridades do ambiente natural. Isto é, as questões do desenvolvimento passam a ser tratadas sob uma perspectiva de alta eficiência/desempenho, a ser alcançada a um custo razoável e com mínima perturbação nos ciclos naturais da matéria. Um dos ciclos mais críticos a serem preservados na atualidade é o da água, substância básica para a vida no planeta.

Neste trabalho, com base em minhas experiências e perspectivas, são analisados alguns dos elementos característicos do ciclo da água na Terra, com destaque especial para os componentes de armazenamento e circulação subterrânea do líquido, nas escalas global, regional e local, e para os principais problemas atualmente enfrentados na avaliação quantitativa de elementos essenciais dos vários ciclos em que se subdivide o ciclo hidrológico.

co. Em seguida são avaliados os principais problemas relacionados com o uso conservativo da água no estado da Bahia. Através de constatações e de algumas reflexões, espero poder estar contribuindo para encaminhar soluções a alguns dos problemas mais cruciais de suprimento de água no Estado, especialmente nas áreas do semi-árido.

AS CIÊNCIAS DAS ÁGUAS

Os estudos das formas pelas quais a água existe distribuída no planeta, do inter-relacionamento hidráulico entre elas e das suas interações físico-químicas com os materiais geológicos e biológicos da litosfera, no contexto do denominado *ciclo natural das águas*, constituem objetos de várias Ciências. A parte atmosférica desse ciclo está incluída na Meteorologia, enquanto a dos mares e oceanos, na Oceanografia. Os processos que se referem à fase sólida são estudados pela Glaciologia. A Hidrologia engloba o estudo das duas formas líquidas de ocorrência da água doce: (i) a Hidrologia Superficial, de observação mais direta, que está mais fortemente vinculada a algumas áreas da Engenharia; (ii) a Hidrologia Subterrânea, avaliada em grande parte por vias indiretas, relaciona-se mais intimamente com vários campos das Geociências.

Na Hidrologia Superficial destacam-se os estudos relacionados com a previsão e controle de inundações, a análise e construção de reservatórios para acumulações superficiais, a realização de balanços de sedimentação e de perdas de água em lagos e barragens, e com a construção de sistemas especiais para disposição de resíduos aquosos, dentre outros. Na Hidrologia Subterrânea destacam-se as questões de avaliação da ocorrência e disponibilidade de água nas rochas da parte externa da litosfera, da determinação das características físicas e químicas dessas águas, da caracterização dos padrões naturais de fluxo subterrâneo, da análise e interpretação da hidráulica de poços e dos estudos sobre transporte e dispersão de solutos e poluentes nos aquíferos.

A Hidrogeologia é uma disciplina da Geologia que trata especificamente das técnicas diretas de locação e de construção de poços e obras de captação de água, e do estudo da influência dos fato-

res geológicos no escoamento e na qualidade das águas subterrâneas. Na Ciência do Solo, da Agronomia, os temas de Hidrologia que despertam interesse incluem os problemas de fluxo de fluidos na zona não saturada do solo, as teorias da infiltração e da evapotranspiração e as questões relacionadas com a agricultura e salinização de solos.

As subdivisões da Hidrologia têm caráter puramente didático. De fato, as águas superficiais e subterrâneas estão hidraulicamente interconectadas em vários níveis, sendo as primeiras os afloramentos superficiais das últimas. Por isso, qualquer alteração efetuada em uma delas pelo uso humano, tem repercussão global no equilíbrio do ciclo hidrológico.

Há três importantes aspectos que tento esclarecer e sublinhar neste trabalho: (i) o uso conservativo dos recursos hídricos é aquele que produz a mínima alteração no balanço regional das águas; (ii) muitos dos atuais desastres rurais e urbanos ocorrem por obras mal planejadas e/ou mal executadas, que não levaram em conta a conservação do equilíbrio hídrico ao nível local e/ou regional; (iii) os informes estatísticos disponíveis sobre uso de água superficial no mundo encobrem o fato de que grande parte dos deflúvios utilizados provêm, de fato, do armazenamento subterrâneo.

O CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico constitui um modelo conceitual simplificado e dimensionado para descrever o complexo sistema global de armazenamento e circulação de água, nos seus diferentes estados, na Terra. A água acumula-se e transita nos oceanos e mares, na atmosfera e nos reservatórios superficiais e subterrâneos da litosfera emersa. Numa escala global, este ciclo corresponde a um sistema fechado, pois água não é criada nem destruída, em grande escala, no planeta. O ciclo inclui não só os movimentos da água entre as fases sólida, líquida e gasosa, mas também aqueles de interligação entre oceanos, atmosfera e litosfera. Esses intercâmbios

de água realizam-se sob a ação dos seguintes campos de energia: (i) o fluxo de calor solar, que controla os processos de evaporação, transpiração e formação de nuvens, e movimenta a atmosfera; (ii) os campos de gravitação, de pressão e das marés da Lua e do Sol, que controlam a precipitação, as correntes marinhas e os escoamentos e infiltrações continentais; (iii) os campos das forças intermoleculares, que controlam os fenômenos de molhagem, capilaridade e viscosidade e os de intercâmbios iônicos interfaciais, que afetam a velocidade de troca e a qualidade dos fluidos nos vários reservatórios.

O ciclo global da água compreende, essencialmente, os seguintes processos sequenciais e repetitivos: (i) a evaporação da água do solo e dos corpos de águas su-

perficiais, através do aquecimento solar; (ii) a transpiração, realizada através dos processos de desenvolvimento das coberturas vegetais dos terrenos; (iii) a condensação na forma de nuvens, com a nucleação de gotículas de água em torno de partículas sólidas microscópicas (poeiras e aerossóis marinhos); (iv) as precipitações atmosféricas, nas formas de chuva, granizo e neve; e (v) o acúmulo e os movimentos laterais da água na superfície terrestre, no solo e no subsolo continental.

Na escala planetária, mais de 577.000 km³ de água se evapora, por ano, dos oceanos e solos. Nessa reciclagem de água doce, os sais ficam acumulados nos respectivos reservatórios. O vapor gerado pelo aquecimento solar nucleia-se como gotas em torno de micropartículas sólidas, as quais formam as nuvens que circulam na atmosfera. Também por causa de variações de temperatura, as gotas podem crescer e retornar à superfície nas formas das precipitações atmosféricas. Uma grande parcela anual (cerca de 458.000 km³) retorna como chuva sobre os próprios oceanos, mas parte dela (da ordem de 113.000 km³/ano) precipita-se sobre as áreas continentais emersas e contribui para manter o fluxo de correntes e realimentar aquíferos (48.500 km³/ano), até seu gradual retorno ao mar (ISC, 1999; UN, 2003).

Uma boa parcela da água que cai sobre os continentes toma diversos rumos no ciclo hidrológico. Parte (25.000 km³/ano) escoar muito rapidamente e logo retorna ao mar. A parcela que se precipita como neve nas calotas polares (9.000 km³/ano), torna-se aprisionada por milhares de anos nas camadas glaciais. Outra parte (14.500 km³/ano), percola através dos solos e rochas poropermeáveis e contribui para o armazenamento dos reservatórios subterrâneos. As águas nos aquíferos fluem lentamente por ação de gradientes hidráulicos, são exploradas por meio de poços, ascendem à superfície terrestre e alimentam os rios e/ou fluem diretamente para o mar. A água subterrânea é também bombeada de volta para a atmosfera antes de encontrar seu caminho para o mar. As plantas, através de suas raízes, sugam a água subterrânea como parte de sua alimentação e a liberam para a atmosfera, como vapor, no processo de transpiração.

Numa escala de bacia hidrográfica, o ciclo hidrológico é apresentado na forma de um balanço hídrico. Nessa escala, a precipitação sobre a área da bacia constitui o termo de entrada no geossistema. A evaporação direta do solo e dos espelhos de água, e a transpiração pelas plantas são termos de saída, normalmente combinados na evapotranspiração. Esta grandeza é estimada usando a evapotranspiração potencial ou o limite superior da evapotranspiração real. O fluxo superficial nas correntes constitui a soma do escoamento laminar sobre o solo da bacia, com o escoamento subsuperficial não saturado e com o fluxo de base dos aquíferos. É também um termo de saída, estimado por medidas de descarga no rio principal próximo à saída da bacia. A última parcela de interesse do balanço é a infiltração profunda ou recarga natural da subsuperfície, que contribui para a reserva hídrica renovável da bacia.

Três aspectos do ciclo hidrológico são relevantes para o planejamento de uso racional de águas de boa qualidade. O primeiro diz respeito ao fato de que a evaporação é um processo altamente eficiente, que produz água pura, destilada (praticamente isenta de sais). O segundo é que a água adquire sais na atmosfera, ao se precipitar e dissolver aerossóis marinhos. Como a quantidade de aerossóis varia com a distância à costa, as chuvas tendem a

ser cada vez mais doces, quanto mais se adentra para o interior do continente. O terceiro resulta dos processos de infiltração e percolação da água no subsolo. As paredes dos poros da maioria das rochas e solos da crosta são eletricamente carregadas, seja pelas reações químicas mineral – eletrolito, seja por defeitos na rede cristalina de certos minerais, como os dos grupos das argilas. Essas superfícies carregadas retêm, com muita facilidade, materiais particulados e microorganismos que constituem macro-moléculas polares. São, portanto, filtros naturais de grande eficiência, fixadores de metais e transformadores da qualidade da água em movimento que, em geral, se traduzem em maior pureza da água.

O tempo de residência da água nos diferentes reservatórios terrestres determina as flutuações nas suas condições de circulação. Na atmosfera e na biosfera, o tempo de permanência da água é pequeno e isto controla os padrões regionais do clima e de vegetação no planeta. Por outro lado, tempos de permanência da ordem de 3.000 a 10.000 anos, nas circulações oceânicas profundas, no fluxo subterrâneo dos aquíferos ou no movimento das geleiras, atuam como moderadores da temperatura e, portanto, do clima e da biosfera. Essas formas mais lentas da circulação global agem como memória, armazenando ou liberando calor e amortecendo as mudanças climáticas. Portanto, é essencial para a manutenção do equilíbrio no planeta que os ciclos das águas sejam preservados numa dinâmica de harmonia. Qualquer perturbação mais severa sobre um de seus elementos pode causar alterações desastrosas para a vida. Os resultados e as previsões das consequências atuais das alterações climáticas, determinadas em grande parte pelo denominado efeito estufa, mostram quão severas podem ser essas mudanças.

O homem interfere de diversos modos sobre os processos de circulação e de transformação da água no ciclo hidrológico. Algumas vezes de forma direta, tal como na construção de barragens e derivações, na regularização de rios ou na superexploração da água subterrânea dos aquíferos. Outras vezes, de forma indireta, como na disposição superficial de efluentes, esgotos e lixos; no uso intensivo de fertilizantes e pesticidas na agricultura irrigada e no

uso excessivo de combustíveis fósseis nos meios de transportes e na geração de energia, entre outros.

Nas formas de uso ou exploração convencional da terra é comum promover-se uma alteração apreciável da paisagem, no intuito de ajustar o terreno às peculiaridades do projeto. Normalmente isso resulta na remoção total ou parcial da vegetação e da cobertura de solo e em severas alterações hidrológicas. Dessa forma, aumentam-se as chances de erosão do subsolo, reduzem-se as taxas de infiltração de chuvas e, conseqüentemente, da recarga do aquífero.

Como exemplos dessas intervenções pode-se citar algumas das grandes obras realizadas em Salvador nas últimas décadas. As avenidas de vales construídas para resolver os graves problemas de tráfego da cidade são consideradas obras-mestras da engenharia urbana. Talvez elas tenham resolvido os problemas de trânsito da época, mas também causaram severas alterações hidrológicas no meio urbano. A cidade sempre sofre com as periódicas ocorrências de inundações das avenidas e com acidentes de deslizamento em suas encostas ou taludes, nas épocas das chuvas.

Conclusivamente, a regra básica de planejamento para um desenvolvimento econômico e social conservativo consiste em realizar o empreendimento ou a operação pretendida de uma forma tal que o balanço hidrológico natural no seu entorno seja mantido ou minimamente alterado. Obviamente, aqui não se inclui a alternativa de não realização, porque se supõe que o desenvolvimento seja bom, precisa ser realizado no local pretendido ou em um outro local.

GEOSISTEMAS HÍDRICOS DO ESTADO DA BAHIA

O estado da Bahia ocupa uma área de aproximadamente 567.000 km², dos quais mais de 50% estão incluídos em sua região semi-árida. Geologicamente, cerca de 30% de sua área é coberta por rochas sedimentares clásticas, com idades varian-

do do Jurássico ao Quaternário; 16% é ocupada por rochas carbonáticas pré-cambrianas do Grupo Bambuí e depósitos correlatos; e os 54% restantes constituem áreas aflorantes de rochas cristalinas e cristalofílicas pré-cambrianas, que compõem o Craton de São Francisco e suas faixas marginais.

Do ponto de vista climático e geomorfológico, o Estado abriga três principais regiões: (i) a *Região Costeira*, caracterizada por relevos de baixadas, tabuleiros e planícies com altitudes inferiores a 300 m e coberturas esparsas de mata Atlântica. Possui um clima tropical quente e úmido (Tipo Af de Köppen), definido por índices pluviométricos superiores a 1.500 mm/ano e temperatura média anual de 23° C; (ii) a *Região Semi-árida*, caracterizada por relevos de 'mar de morros' e amplas planícies, e por vegetação do tipo caatinga, com um clima quente (Tipo Bsh de Köppen), de alta insolação

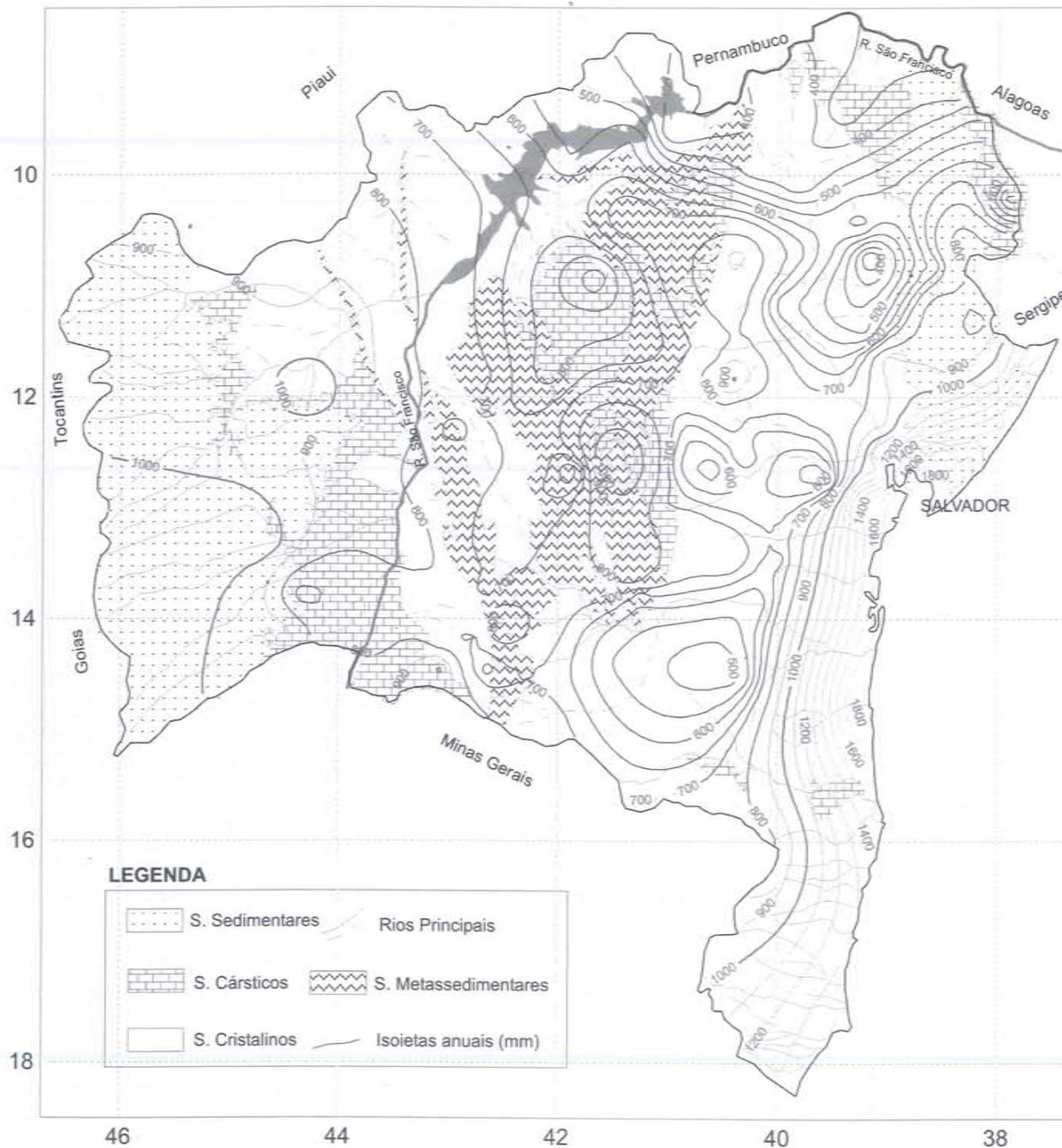
e temperaturas médias mais elevadas, geralmente superiores a 25° C, bem como por uma pluviometria inferior a 700 mm/ano; e (iii) a *Região das Chapadas*, de grande extensão territorial e com elevações acima de 600 m e vegetação de cerrado, compreendendo uma região de clima quente e úmido mais moderado, com estação seca de inverno (Tipo Aw de Köppen), com chuvas anuais acima de 1.000 mm/ano e que compõem, em grande parte, duas faixas que margeam o vale do rio São Francisco (Figura 1).

No estado da Bahia, a água é fundamentalmente requerida para o abastecimento doméstico de uma população de mais de 12 milhões de habitantes e de rebanhos bovinos e ovino-caprinos de mais de 20 milhões de cabeças, para a irrigação da agricultura de todo o estado e, especialmente, das áreas das Chapadas e do Semi-árido. A par disso, há as demandas industriais concentradas nos seus pólos mais desenvolvidos, nas atividades de mineração e de recreação, lazer e turismo.

Um dos maiores desafios da Hidrologia na Bahia está em entender como se processa a circulação natural das águas, ao nível regional de suas bacias hi-

Um dos maiores desafios da Hidrologia na Bahia está em entender como se processa a circulação natural das águas, ao nível regional de suas bacias hidrográficas e/ou ao nível local de sub-bacias, em função dos condicionamentos geológicos, geomorfológicos e de natureza climática

Figura 1
Pluviometria e geosistemas hídricos subterrâneos do estado da Bahia



drográficas e/ou ao nível local de sub-bacias, em função dos condicionamentos geológicos, geomorfológicos e de natureza climática. Além disso, é imperativo avaliar como essas circulações são perturbadas pelas atividades humanas de uso de solo e água, assim como definir as formas de exercício dessas atividades de modo a atingir um desenvolvimento estável, à luz do princípio geral da conservação.

A Região Costeira – O estado da Bahia possui a linha de costa mais extensa do país, com uma zona costeira diversificada e definida por uma ampla variedade de ambientes de circulação hídrica e de sedimentação, incluindo: (i) as mais importantes construções coralinas do Atlântico Sul; (ii) numerosos estuários e baías; (iii) extensas planícies de cordões litorâneos; (iv) manguezais, terras úmidas

e lagoas; e (v) campos de dunas. Essas unidades possuem uma história evolutiva complexa, modulada por variações climáticas e por flutuações no nível relativo do mar durante todo o período Quaternário (BITTENCOURT, 1996).

Numa faixa que se estende por cerca de 100 km de largura da costa, vive grande parte da população baiana. Em consequência de uma crescente e desordenada ocupação industrial e urbana, estão surgindo problemas que afetam a estabilidade das bacias de drenagem superficial sobre essa faixa, de seus sistemas estuários e baías e da própria bacia oceânica. Os mais graves deles incluem: (i) a redução acentuada na qualidade das águas superficiais e freáticas; (ii) uma expressiva redução nos estoques e o declínio da pesca comercial e artesanal; e (iii) a poluição das praias e o registro de ocorrências de erosão e enchentes costeiras.

Nessa área, os principais desafios hidrológicos consistem em obter o zoneamento quantitativo de seus reservatórios aquíferos, em termos de produtividade e qualidade química das águas, caracterizar o inter-relacionamento dessas águas com a água do mar, assim como definir os riscos de contaminação desses reservatórios por despejos de resíduos industriais, pela urbanização acelerada da área com realização de obras que interferem na circulação natural das águas e/ou pelas pressões excessivas das atividades de turismo/lazer.

O território denominado como Região Metropolitana de Salvador (RMS) cobre uma extensão superficial de 2.100 km², na qual se concentram cerca de 3,4 milhões de habitantes. Esta área contém riquezas naturais atrativas: (i) uma das mais importantes reservas de água doce, potável e mineral do Estado, estimada em cerca de 600 bilhões de metros cúbicos, com disponibilidade anual de 500 milhões de metros cúbicos (LIMA, 1999); (ii) importantes reservas hídricas superficiais nas bacias dos rios Joanes, Ipitanga e Jacuípe, ainda hoje usadas para suprir Salvador e os centros industriais da RMS; (iii) áreas ditas de proteção permanente, tais como o parque de dunas e lagoas do Abaeté, a APA Joanes – Ipitanga e o parque de dunas Abrantes – Jauá, dentre outros; (iv) praias de águas tranquilas e mornas usadas para o lazer de sua imensa população e de turistas; (v) e, ainda, áreas ecologicamen-

te sensíveis, tais como mangues, pântanos de água doce, numerosas lagoas, além de terras úmidas e planícies de inundação.

Apesar dessa imensa riqueza, nas últimas décadas a RMS tem se desenvolvido de forma não conservativa. Grandes obras de engenharia, como a construção de barragens e aeroportos, a instalação de centros industriais, a implantação de grandes núcleos habitacionais e as aberturas de amplas avenidas foram realizadas sem levar em conta seus efeitos sobre a circulação natural das águas. Em 1963 foi instalado o Centro Industrial de Aratu (CIA), iniciado com 194 empresas dos mais variados ramos (química, petroquímica, metalúrgica, mecânica, têxtil, bebidas, alimentos e outras). Nesse empreendimento não houve qualquer preocupação com a disposição dos vários efluentes industriais, muitos dos quais tóxicos, corrosivos e danosos ao meio físico e aos seres vivos. No final da década de 70 foi implantado o Complexo Petroquímico de Camaçari (COPEC), com cerca de 54 indústrias. Apesar de maiores cuidados, ali têm sido registrados sérios problemas de poluição de solos e águas superficiais e subterrâneas. Tanto que a empresa CETREL, responsável pelo monitoramento da água no COPEC, já interditou 18 poços produtores e vem operando, desde 1996, uma barreira hidráulica para a contenção do espalhamento dos poluentes (NOBRE *et al.*, 1998). Estudos geofísicos têm se mostrado efetivos para avaliar a extensão e intensidade dessa poluição, assim como para caracterizar os diferentes padrões de propagação de plumas poluentes no aquífero Recôncavo (LIMA *et al.*, 1995; RÜHLOW *et al.*, 1999; LIMA, 1999).

Além disso, nas zonas urbanas da maioria das sedes municipais, as bacias hidrográficas encontram-se bastante deterioradas, tanto por causa do lançamento continuado de esgotos, quanto pela disposição inadequada de lixo e outros resíduos urbanos e industriais. Aqui também a geofísica tem desempenhado importante papel na avaliação quantitativa das alterações no solo e água causadas por formas inadequadas de disposição de resíduos (CAVALCANTI *et al.*, 2001).

Assim, os principais problemas da RMS se relacionam com: (i) a exploração excessiva e desordenada da água subterrânea dos aquíferos, seja para

uso industrial no CIA e no COPEC, seja para atender ao suprimento das comunidades e dos condomínios do litoral norte de Salvador, seja pela sua crescente utilização na indústria de águas minerais, refrigerantes e cervejas. Tudo isso sem se dispôr, ainda, de um modelo preciso sobre a distribuição espacial e a interconexão dos seus vários intervalos aquíferos, assim como de uma medida da extensão exata daqueles horizontes já efetivamente comprometidos pela poluição industrial; (ii) a exploração generalizada de água subterrânea na maioria das sedes municipais, em função de que quase toda a água superficial dessas áreas já está contaminada por lixo e esgotos domésticos. No entanto, não se dispõe de um entendimento adequado do funcionamento hidráulico desses aquíferos, nem de suas interações com os corpos de águas superficiais; (iii) o desenvolvimento acelerado da urbanização na zona costeira norte da RMS, com a implantação de numerosos condomínios horizontais, de grandes empreendimentos turísticos e de lazer, tem levado a uma exploração expressiva do aquífero costeiro, sem haver um dimensionamento real de suas reservas hídricas, nem da influência da água do mar sobre esse aquífero. Além disso, essas áreas não contam com rede instalada de esgotamento sanitário, de modo que o uso generalizado da disposição direta no solo coloca em risco a potabilidade da água em vários locais.

A Região Semi-árida – O setor semi-árido do Estado apresenta condições ambientais muito similares às do *Polígono das Secas* do Nordeste brasileiro. Nessa região, os índices pluviométricos são baixos (entre 350 mm e 700 mm anuais), a insolação é muito forte (2.800 h/ano) e as temperaturas médias bem elevadas (acima de 25° C). Além disso, a situação torna-se agravada pela irregularidade espacial e temporal na distribuição das chuvas. Essa região ocupa uma área de 278.000 km², a maior parte da qual constituída de rochas cristalinas pré-cambrianas (Figura 1). Por causa da aridez climática, a rede de drenagem superficial é pratica-

mente constituída por rios intermitentes, com exceção da parte do vale do São Francisco. Assim, em sua maior parte, os suprimentos das populações e atividades econômicas com água superficial estão obviamente descartados.

Por outro lado, em função de características geomorfológicas especiais, da aridez do clima e do alto potencial de contaminação, o sistema centralizado de armazenamento superficial em açudes mostrou-se inadequado como forma de suprir as populações e suas atividades agro-pecuárias (REBOUÇAS, 1973). Portanto, tal política deve ser regionalmente desestimulada. Alternativas locais de armazenamento de água das chuvas, tal como sistemas domiciliares ou comunitárias, barragens subterrâneas nos aluviões e pequenas barragens em correntes superficiais podem ser satisfatórias para atender às necessidades domésticas essenciais. Todavia, um suprimento mais expressivo só pode ser alcançado através da exploração racional da água subterrânea.

Nas regiões semi-áridas, o intemperismo químico é muito incipiente e o manto de alteração das rochas não excede de 10 m a 15 m de espessura. Por isso a água subterrânea fica armazenada predominantemente em zonas subverticais estreitas e ramificadas, que se associam aos densos fraturamentos de zonas de falhas. Como consequência, os aquíferos são lateralmente restritos, descontínuos, heterogêneos e de difícil exploração. Como nessas faixas os escoamentos superficiais também são controlados pelos fraturamentos, tal associação tem sido usada como critério básico de locação de poços no nordeste (CHADA FILHO, 1965; CRUZ, 1974).

A disponibilidade hídrica do sistema cristalino da Bahia, estimada por diferentes autores, situa-se no intervalo de 180 m³ a 1.000 m³/km²/ano. Sua exploração, até hoje guiada por critérios geológicos convencionais, tem tido resultados não muito satisfatórios. A produtividade dos poços é normalmente baixa, com vazões específicas médias variando de 0,08 m³/h a 0,15 m³/h por metro de rebaixamento, em po-

ços cuja profundidade média é de 60 m (LEAL, 1969; BRITO NEVES; MANOEL FILHO, 1972). Além disso, a proporção de insucessos medida pelo número de poços secos é muita elevada (cerca de 35%). Do ponto de vista químico, as águas são predominantemente cloretadas, com salinidades variando de 195 mg/l a 18.600 mg/l e com uma média de 3.000 mg/l de sólidos dissolvidos (CERB, 1983).

Embora o ambiente das rochas cristalinas seja hidrologicamente complexo, há numerosas evidências de que ele pode armazenar quantidades expressivas de água (LEAL, 1969; CRUZ, 1974; MEDEIROS; LIMA, 1990). Tais águas, contudo, estão mais salinizadas que o normal nas zonas sedimentares e há uma ampla variabilidade nas suas composições químicas, dentro de uma mesma bacia hidrográfica (CRUZ, 1974). A complexidade estrutural de seus aquíferos manifesta-se por uma baixa produtividade dos poços e pela elevada percentagem de poços secos. Isto reflete o fato de que, na locação de poços, o uso isolado de um critério geológico é precário e deve ser complementado com estudos técnico-científicos mais apropriados. Técnicas geoelétricas eficientes têm sido desenvolvidas no CPGG/UFBA para auxiliar na locação de poços nesses aquíferos e similares (MEDEIROS; LIMA, 1990).

Há sugestivas evidências de que as variações composicionais observadas na água dessa região não são aleatórias, mas seguem alguns padrões sistemáticos. Por exemplo, tem sido consistentemente observado que a concentração de sais diminui com o aumento da profundidade do nível estático da água subterrânea. Mais especificamente, há registros de um crescimento gradual da salinidade no sentido do fluxo superficial (REBOUÇAS, 1973; CRUZ, 1974). Alguns estudos reportam variações sazonais de qualidade, com diminuições de concentração em períodos de estiagem prolongada. Outros, ainda, indicam que a salinidade da água diminui com a duração do período de bombeio do poço. Essa variabilidade espacial e temporal na qualidade da água deve necessariamente ser considerada por qualquer teoria que se proponha explicar a origem da salinização da água nos aquíferos do semi-árido.

Alguns autores argumentam que a salinização observada resulta de efeitos da composição mine-

ralógica das rochas ou do material de sua alteração (CRUZ, 1974). Outros, a consideram um resultado de misturas com águas fósseis, introduzidas nos aquíferos durante a última transgressão marinha sobre a costa nordestina (SCHOFF, 1972). A maioria, todavia, a atribui à influência de fatores climáticos, especialmente, às altas taxas de evaporação que caracterizam o ambiente semi-árido.

Um modelo simples pode ser usado para mostrar que, efetivamente, a evaporação tem um grande efeito no processo de concentração de sais nas águas do ambiente semi-árido. Uma condição aproximada de um balanço espacial entre as taxas de descarga (evapotranspiração) e de recarga (precipitação) não implica manter-se invariante a salinidade da água. Naturalmente, a recarga é mais favorecida nas zonas dos talwegues, enquanto a evapotranspiração predomina nos vales. Sob essas condições, extraindo-se água pura nos vales de um sistema realimentado com uma água de salinidade constante, há uma tendência para concentrar sais no aquífero, num padrão que cresce transversalmente e atinge seu máximo no eixo da drenagem. Esse mecanismo explica tanto a variação espacial observada na distribuição da salinidade, quanto a variação temporal monitorada com um bombeio contínuo de poços.

Se o suprimento de água das populações da região semi-árida não puder ser viabilizado através dos estoques internos disponíveis, uma solução técnica alternativa poderá ser a de importar parte da água de regiões sedimentares vizinhas ao local a ser atendido. Essa alternativa tem como vantagens: (i) melhorar a qualidade da água de suprimento em relação àquela produzida no aquífero cristalino; (ii) reduzir o uso de dessalinizadores de água, que está difundido na região e que produz um rejeito de alto poder poluidor; (iii) otimizar um custo final para a água produzida, através de um dimensionamento mais adequado do sistema de adução da água importada.

A Região das Chapadas – Essa região fisiográfica inclui áreas da Serra do Espinhaço, da Chapada Diamantina e do Chapadão do Urucuia, onde as temperaturas são mais amenas e os índices pluviométricos mais elevados, variando de 700 mm a 1.100 mm/ano, na área da Chapada Diamantina, e de 700 mm a 1.600 mm/ano, do vale do São Francisco para oes-

te (Chapadão do Uruçuia). Nessas áreas é possível adotar soluções de suprimento individuais ou combinadas, usando tanto os recursos hídricos superficiais quanto os subterrâneos, de uma forma otimizada em termos técnicos e econômicos.

Ela comporta os seguintes geosistemas: *Sistemas Metassedimentares* (Supergrupo Espinhaço e grupos Paraguassú e Chapada Diamantina), compostos por seqüências clásticas que ocupam cerca de 68.000 km² do Estado; *Sistemas Carstificados*, desenvolvidos sobre os metassedimentos carbonáticos do Supergrupo São Francisco (grupos Macaúbas e Bambuí) e os depósitos correlatos dos grupos Estância e Rio Pardo que ocupam, juntos, uma extensão superficial de 89.000 km²; e *Sistemas Granulares*, incluídos no Grupo Uruçuia, que cobre mais de 80.000 km² da parte oeste do vale do São Francisco (Figura 1).

Do ponto de vista da hidrologia subterrânea, o conjunto litológico dos sistemas metassedimentares corresponde a um sistema de dupla porosidade: uma microscópica, intersticial e, outra, macroscópica, originada por fraturamentos. Nos setores mais intensamente metamorfisados, a porosidade intergranular torna-se muito obliterada e o sistema comporta-se como o das rochas cristalinas. O conjunto compreende uma porção superior freática, mas existem importantes níveis confinados com águas pressurizadas (BRITO NEVES; MANOEL FILHO, 1972).

As reservas hídricas subterrâneas armazenadas e exploráveis nesse geosistema são estimadas em 250 milhões e 45 milhões de m³/ano, respectivamente. A produtividade dos poços, em geral, varia de 1,0 m³/h a 18 m³/h, com média de 6,0 m³/h. O índice de insucesso com poços secos ou de vazão insuficiente é estimado em 25%. As águas são, em geral, bicarbonatadas de cálcio, magnésio e sódio, e apresentam resíduos sólidos totais abaixo de 500 mg/l. São, portanto, águas de excelentes qualidades químicas, que podem ser usadas para abastecimento público e para irrigação, desde que os reservatórios regionais sejam convenientemente dimensionados e hidráulicamente testados.

O comportamento hidrológico dos sistemas carstificados é também bastante peculiar. Os vazios nessas rochas são de origem secundária, representa-

dos por abundantes juntas de estratificação e por densos fraturamentos, relacionados à superposição de tectônicas quebradiças. Tais vazios são ampliados por processos químicos de dissolução, que parecem ter atuado de maneira mais intensa no extremo sul da Chapada Diamantina. Dados de numerosas perfurações mostram que a zona saturada desse sistema freático inicia-se a poucos metros abaixo da superfície e pode alcançar mais de 200 m de profundidade (LIMA; DIAS, 1983).

As reservas anuais exploráveis, estimadas grosseiramente em 3,4% das precipitações anuais, são de 23.400 m³/km²/ano (GUERRA; NEGRÃO, 1996). A capacidade de produção desse aquífero varia amplamente. O índice de poços secos é da ordem de 20% e as vazões, nos casos produtivos, variam de 4,0 m³/h a mais de 30 m³/h, com média de 8,0 m³/h. Na parte ocidental do vale do São Francisco, onde esses cársticos estão melhor desenvolvidos, a produção média aumenta ligeiramente (10 m³/h). As águas são, em geral, de boa qualidade, bicarbonatadas cálcicas e calcimagnesianas. Observa-se que, nelas, os teores de sais dissolvidos têm um forte controle climático, com valores inferiores a 500 mg/l na parte oeste do São Francisco e no baixo rio Pardo, e valores mais altos, 1.000 mg/l a 2.000 mg/l, nas zonas de descargas em setores de maior aridez (BRITO NEVES; MANOEL FILHO, 1972).

O Chapadão do Uruçuia é constituído essencialmente de arenitos finos a médios, contendo intercalações de siltitos e folhelhos e, localmente, níveis conglomeráticos, todos de idade Cretácea Inferior. Representa uma das mais importantes unidades aquíferas do Estado e tem grande importância na sustentação das vazões de duas das maiores bacias hidrográficas do país, a do São Francisco e a do Tocantins. Nesse extenso chapadão desenvolve-se, hoje, um processo acelerado de agricultura mecanizada com irrigação intensiva, principalmente de soja, café, arroz e algodão, além de uma extensiva atividade pecuária. Isso tem levado a uma intensa exploração de água, tanto captada diretamente nos rios e riachos, quanto extraída de aquíferos através de poços tubulares profundos.

A rede de drenagem sobre o chapadão é estruturalmente controlada e escoas as águas das chuvas e grande parte dos deflúvios subterrâneos para

a bacia do rio São Francisco. Não se dispõe, ainda, de um balanço hidrológico regional, capaz de permitir a definição do potencial explorável da região, mas suas águas já estão sendo severamente exploradas. Das disponibilidades hídricas subterrâneas e das características hidráulicas dos aquíferos só existem estimativas grosseiras. De há muito suspeita-se que elas sejam expressivas (BRITO NEVES; MANOEL FILHO, 1972), mas somente a partir do ano de 2000 deu-se início a estudos precisos de avaliação desse sistema aquífero (AMORIM JUNIOR; LIMA, 2003). Já existem cadastradas algumas centenas de poços, sendo que muitos estão sendo implantados aleatoriamente, a um ritmo preocupante.

Nessas condições, torna-se necessário realizar investigações hidrológicas avançadas, no sentido de apoiar os usuários das águas com informações precisas sobre as reais disponibilidades hídricas, as principais características do aquífero, assim como sobre os procedimentos a serem adotados no ordenamento de sua exploração. É preciso, também, definir as regiões de maiores necessidades hídricas e inventariar, além dos parâmetros hidrológicos locais e regionais, todas as formas de extração distribuídas nas suas principais bacias hidrográficas, no sentido de caracterizar o regime real de exploração a que esse geosistema está sendo submetido. Para alcançar esses objetivos será essencial integrar nos trabalhos o uso do ferramental da geofísica aplicada.

CONCLUSÕES

Os grandes desafios da Hidrologia na Bahia, para atender satisfatoriamente o desenvolvimento estadual nas próximas décadas, de forma estável e em conformidade com o princípio da conservação, incluem: (1) entender melhor como se processa a circulação natural das águas nas três regiões morfoclimáticas do Estado; (2) caracterizar os elementos controladores dessa circulação, dimensionar os principais reservatórios e quantificar as ordens de grandeza e as variabilidades dos termos fontes e sorvedouros e do tempo de permanência da água; (3) avaliar como esses geosistemas estão sendo alterados pelas atividades humanas e buscar definir como elas devem ser realizadas ou modificadas.

Para superar esses desafios será necessário completar, integrar e homogeneizar os conhecimentos sobre a infra-estrutura física (geologia e geomorfologia), sobre os condicionamentos climáticos e hidrológicos, assim como sobre os elementos antropogênicos de uso da terra, dos materiais geológicos e da água, avaliando seus efeitos e interações mútuas na estabilidade de cada geosistema regional. Além disso, para uma exploração mais bem sucedida dessas regiões, é necessário utilizar, além das ferramentas geológicas, levantamentos geofísicos com métodos elétricos, eletromagnéticos e/ou potenciais. Tais métodos têm se mostrado muito eficientes e econômicos, porque permitem não só descrever adequadamente a geometria estrutural dos aquíferos, mas, também, inferir sobre a qualidade de suas águas (LIMA; DIAS, 1983; MEDEIROS; LIMA, 1990; LIMA, 1993; SRI NIWAS; LIMA, 2003).

Cada geosistema constitui uma entidade complexa que engloba a natureza e a estrutura do substrato geológico-geomorfológico, os diferentes fluidos que preenchem os poros das rochas e solos de cada substrato, a rede de drenagem e os corpos superficiais de água que definem as bacias e constituem afloramentos da água subterrânea, a cobertura vegetal natural, os usos agrícolas das terras e os padrões de circulação de água na atmosfera em diferentes escalas espaciais e de tempo. O entendimento desses geosistemas, portanto, requer a atuação integrada de vários especialistas, como geólogos, geofísicos, meteorologistas, engenheiros (hidrólogos e agrônomos), biólogos e cientistas sociais.

Tendo em conta o caráter multidisciplinar dessa tarefa, será preciso encontrar modos efetivos para desenvolver um trabalho cooperativo de vários cientistas de diferentes especialidades e uma forma de comunicação apropriada, para fazer chegar os resultados práticos obtidos aos organismos do governo e às comunidades imediatamente interessadas. Nesse sentido, parece fundamental, para superar os atrasos e melhor atender às exigências do desenvolvimento, a criação de um instituto ou centro de pesquisa da água com as seguintes finalidades: (a) obter, tornar compatíveis e integrar resultados de ações e programas dos diversos órgãos fe-

derais e estaduais, que atuam em relação à água, nos referidos campos científicos; (b) desenvolver novos programas orientados para gerar ou ampliar a compreensão de problemas hidrológicos em áreas críticas do Estado; (c) articular ações para estabelecer uma rede cooperativa envolvendo centros de pesquisa das universidades e organismos estaduais no sentido de agilizar a execução dos trabalhos e evitar a duplicação de esforços e recursos, hoje muito comum entre nós.

REFERÊNCIAS

- AMORIM JUNIOR, V.; LIMA, O. A. L. Aquífero Uruçuia: uma avaliação hidrogeológica integrando eletroresistividade e polarização induzida no domínio do tempo. In: CONG. INTERNACIONAL DE GEOFÍSICA, 8º. Rio de Janeiro: Soc. Bras. Geof., set. 2003. CDROM.
- BITTENCOURT, A. C. S. P. As coberturas terciárias e quaternárias do interior e da Zona Costeira. In: *Mapa Geológico do Estado da Bahia: texto explicativo*. Salvador: SGM, 1996. Capítulo VIII. p. 165-181.
- BRITO NEVES, B. B.; MANOEL FILHO, J. Geologia e províncias hidrogeológicas da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26º. *Anais...* Salvador, 1972. v. 1, p.195-214.
- CADASTRO DE POÇOS TUBULARES DO ESTADO DA BAHIA. Salvador: CERB, 1983. 10 v.
- CAVALCANTI, S. S.; SATO H. K.; LIMA, O. A. L. Geofísica elétrica no estudo da hidrologia subterrânea do aterro metropolitano Centro-Salvador, Bahia. *Rev. Bras. Geof.*, v.19, n.2, p.155-168, 2001.
- CHADA FILHO, L. Água subterrânea em rochas pré-cambrianas do nordeste. *Água Subterrânea*, v.1, n.3, p.21-32, 1965.
- CRUZ, W. B. Alguns aspectos de circulação e salinização de águas subterrâneas em rochas cristalinas do Nordeste Brasileiro. Recife: SUDENE, 1974. (SUDENE, Série Hidrogeologia, 8)
- GUERRA, A. M.; NEGRÃO, F. I. Domínios hidrogeológicos do estado da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 9º. *Anais...* 1996. p.108-112. ...
- ISC. Natural Resources and Development. Focus: Water – The Lifeline of Our Future. Tübingen, Alemanha: Institute for Scientific Co-operation, 1999. v. 49-50.
- LEAL, A. S. *Considerações sobre a circulação de água em rochas cristalinas e salinização em região árida: Área piloto de Juazeiro-Curacá, BA*. Recife: SUDENE, 1969. (Série Hidrogeologia, n. 24).
- LIMA, O. A. L. *Caracterização hidráulica e padrões de poluição no Aquífero Recôncavo na Região de Camaçari – Dias D'Ávila*. 1999. 123 p. Dissertação. (Prof. Titular) – Universidade Federal da Bahia, Salvador.
- _____. Geophysical evaluation of sandstone aquifers in the Recôncavo-Tucano basin, Bahia-Brazil. *Geophysics*, v. 58, n. 11, p. 1689-1702, 1993.
- _____. DIAS, C. A. Application of geophysical methods to groundwater exploration in Bahia, northeastern Brazil. *Proc. Internat. Symp. On Applied Geophysics in Tropical Regions*, p.492-517, Belém, 1983.
- _____. SATO, H. K.; PORSANI, M. J. Imaging industrial contaminant plumes with resistivity techniques. *Jour. Appl. Geophys.*, v. 34, p.93-108, 1995.
- MEDEIROS, W. E.; LIMA, O. A. L. A geoelctrical investigation for groundwater in crystalline terrains of Central Bahia, Brazil. *Ground Water*, v. 28, n. 4, p. 518-523, 1990.
- NOBRE, M. M.; NOBRE, R. M.; SANTOS, P. P.; VILELA, G. M. Effective groundwater hydraulic control of an organic plume at the Camaçari Petrochemical Complex. INTERNAT. SYMP. IAWQ, Salvador, 1998.
- REBOUÇAS, A. C. *Le probleme de l'eau dans la Zone Semi-arid du Brésil: evaluation de ressources. Orientation pour la Mise em Valeur*. 1973. These (Docteur és Sci. Nat.) – Univ. Louis Pasteur, Strasburg, França.
- RÜHLOW, A.; TEZKAN, B.; LIMA, O. A. L. DC resistivity and time-domain induced polarization survey for the study of groundwater contamination in Bahia, Brazil. *Eur. Jour. Env. Eng. Geophys.*, v. 3, p. 143-159, 1999.
- SCHOFF, S. L. Origin of mineralized water in Precambrian rocks of the Upper Paraíba Basin, Paraíba, Brazil. *Geol. Survey Water-Supply Paper* 1663-H, 1972.
- SRI NIWAS; LIMA, O. A. L. Aquifer parameter estimation from surface resistivity data. *Ground Water*, v. 41, n.1, p. 94-99, 2003.
- UN. Water for people, Water for Life. *The United Nations World Water Development Report, Executive Summary*, 2003.