PROPOSTA DE MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEITUAIS APLICADOS AOS AQÜÍFEROS DA REGIÃO DO DISTRITO FEDERAL

ENÉAS OLIVEIRA LOUSADA & JOSÉ ELÓI GUIMARÃES CAMPOS

Abstract *PROPOSAL OF CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODELS APPLIED TO AQUIFERS OF THE FEDERAL DISTRICT, BRASIL* This paper presents the conceptual aquifers models applied to the Distrito Federal region emphasizing the hydrogeologic information that control the groundwater flow conditions. Generally, the mathematical models are based on conceptual models, which are based on local observations. The proposed models have been formulated from a data base collected in several places of the Distrito Federal, mainly during deep wells construction which are important information source about geology and hydrogeology. The groundwater occurrence conditions are different, considering characteristics of the aquifer, climate, soils type and structural conditions. It is difficult to explain mathematically all parameters, however the conceptual models can be a representation of the natural hydrogeologic conditions and can be proved by applying scientific studies. The main objective of mathematical or conceptual modeling is to represent the real conditions of occurrence and groundwater movement. The main goal of this paper is to show the conceptual hydrogeological models proposed in the Distrito Federal region, considering the physical and hydraulic characteristics and the area where they can be applied. The groundwater occurrence conditions and movement knowledge can help in the management of groundwater resources, groundwater supply and protection of recharge areas. Based on hydrodynamic data acquired from deep wells and physical/structural characteristics of the rocks associated to the different fractured aquifers overlain by soil coverage, four hydrogeological flow models were described: (1) the two potentiometric surfaces model, (2) the fractured-carstic model (3) the unique confined potentiometric surface model, (4) the unique non confined potentiometric surface model.

Keywords: Conceptual aquifer model, fractured aquifer, intergranular aquifer.

Resumo Este trabalho reúne, na forma de modelos conceituais, informações sobre as condições hidrogeológicas dos aquíferos presentes no Distrito Federal. Modelos matemáticos e computacionais são, via de regra, gerados a partir de propostas conceituais subsidiadas por observações locais. A elaboração dos modelos apresentados teve como base observações *in situ* em diversas localidades do Distrito Federal, principalmente durante a construção de poços tubulares profundos que são importantes fontes de informações sobre a litologia e condições hidrogeológicas. As diversas condições de ocorrência da água subterrânea estão associadas às características dos aquíferos, clima, tipos de solos e condições estruturais, dentre outras. A determinação e a inclusão de todas as condições de contorno em um modelo, não é simples, no entanto, os modelos conceituais devem ser considerados como a representação mais próxima possível das condições naturais. A aplicação de técnicas analíticas específicas refina o conhecimento quanto aos parâmetros controladores dos modelos, resultando em uma representação mais confiável das condições hidrogeológicas naturais. O objetivo das modelagens, matemáticas ou conceituais, é a representação das condições de ocorrência e modo de circulação da água subterrânea para subsidiar a gestão da exploração e proteção dos aquíferos. O objetivo deste artigo é expor as propostas de modelos hidrogeológicos para o Distrito Federal, considerando suas características físicas e hidráulicas e área onde podem ser aplicados. O conhecimento aprofundado das condições de ocorrência e circulação da água subterrânea auxilia na gestão dos recursos hídricos no que se refere à otimização do uso das reservas hídricas disponíveis e proteção das áreas de recarga. Com base em dados hidrodinâmicos adquiridos em poços tubulares profundos e características físicas / estruturais das rochas associadas aos diferentes meios aquíferos, foram propostos quatro modelos hidrogeológicos: (1) modelo das duas superfícies potenciométricas, (2) modelo fissuro-cárstico, (3) modelo de superfície potenciométrica única com confinamento, (4) modelo de superfície potenciométrica única sem confinamento.

Palavras-chave: modelo aquífero conceitual, aquífero fraturado, aquífero intergranular.

INTRODUÇÃO As águas subterrâneas constituem uma porção significativa do sistema hídrico global. De todo volume de água disponível na Terra apenas cerca de 6% pode ser utilizado diretamente pelo homem, o que equivale a $8,2 \times 10^6 \text{ km}^3$. Deste total, de 60 a 80% é constituído de água subterrânea, o que amplia a sua importância como fonte de abastecimento.

O consumo mundial de água cresceu mais de seis vezes entre 1990 e 1995 (Fetter 1994), mais que o dobro da taxa de crescimento da população, e continua a crescer com a elevação de consumo dos setores agrícola, industrial e residencial. As formas de ocupação dos solos e uso das águas ao longo da evolução das civilizações

resultaram nas atuais condições de degradação. Uma prática comum é a super exploração dos mananciais desconsiderando suas condições de reabastecimento. O resultado é a redução da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea. O recurso hídrico subterrâneo constitui reserva estratégica importante por ser menos susceptível à contaminação, produzir água de boa qualidade na maioria dos casos, não estar sujeito à evaporação direta, fornecer demanda sustentável em períodos de estiagem e apresentar baixo custo para captação.

A exploração desse recurso requer o conhecimento aprofundado das características químicas e hidrogeológicas dos

meios aquíferos. O resultado das pesquisas aplicadas ao assunto surge, geralmente, sob a forma de caracterização dos modelos de circulação hídrica subterrânea.

Os modelos conceituais compõem uma simplificação das condições naturais de circulação das águas ou representam o entendimento das condições hidrogeológicas sobre bases tridimensionais, possibilitando explicar de forma didática o comportamento dos fluidos em subsuperfície. Podem ser imprecisos ou conter simplificações, no entanto, apresentam subsídios para o conhecimento dos aquíferos e para sua gestão (Rosen & LeGran 2000).

A elaboração de modelos hidrogeológicos se torna complexa considerando-se que devem exprimir os processos naturais que compõem o ciclo hidrológico em subsuperfície. De modo geral, os modelos matemáticos são subsidiados pelos conceituais sugeridos a partir de observações locais. No entanto, as condições de ocorrência da água subterrânea são extremamente variáveis, em função da diversidade das características dos aquíferos, clima, tipos de solos, condições estruturais, dentre outras. Exprimir todas essas condições de contorno não é simples, contudo, os modelos conceituais podem ser testados com a utilização de técnicas específicas, tornando-os uma representação factível das condições hidrogeológicas naturais. O objetivo da modelagem matemática, computacional ou conceitual, é a representação mais próxima possível das reais condições de ocorrência e modo de circulação da água subterrânea.

Os modelos conceituais têm importância adicional, uma vez que são as bases para a elaboração dos modelos matemáticos e computacionais, em geral, mais robustos e complexos. Por exemplo, se um aquífero confinado é tratado como um sistema livre, os valores dimensionais como condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e transmissividade obtidos de modelos matemáticos serão incorretos e poderão trazer prejuízos na gestão da exploração do referido aquífero.

O cerne deste artigo é expor as propostas de modelos hidrogeológicos conceituais para o Distrito Federal, considerando suas características físicas e hidráulicas e área onde podem ser aplicados. O conhecimento aprofundado das condições de ocorrência e circulação da água subterrânea auxilia na gestão dos recursos hídricos no que se refere à otimização do uso das reservas hídricas disponíveis, proteção das áreas de recarga e remediação de aquíferos degradados.

Estudos e técnicas específicas podem ser utilizados para testar os modelos conceituais, dentre os quais pode-se citar:

- estudos hidrogeológicos clássicos para quantificar a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos;
- análises isotópicas de $d^{18}O$, deutério, CFC's, trítio e outras para datar as águas e inferir a respeito das áreas de recarga; e,
- ensaios com traçadores para investigação quanto ao modo de circulação e padrões das redes de fluxo da água subterrânea.

ASPECTOS FÍSICOS DO DISTRITO FEDERAL Geologia
No Distrito Federal ocorrem rochas atribuídas aos grupos Canastra e Paranoá de idade Meso/Neoproterozóica, Araxá e Bambuí de idade Neoproterozóica, além das coberturas de solos e aluviões cenozóicos.

Freitas-Silva & Dardenne (1994) abordaram a estratigrafia regional do Grupo Canastra. É composto por sericita filitos, clorita filitos, calcifilitos, quartzo-sericita filitos com lentes e níveis de quartzitos, metarritmitos e raras lentes de mármore finos próximo à base da sequência. Unidade correlacionável com as formações

Serra do Landim e Paracatu das áreas-tipo (situadas ao sul do DF, na região de Paracatu MG).

Os trabalhos de Faria (1995) e Campos & Freitas-Silva (1998) abordam os litotipos do Grupo Paranoá no Distrito Federal. É uma sequência psamo-pelito-carbonatada composta por sete unidades descritas, da base para o topo, como unidades: **Q₂** (quartzitos conglomeráticos), **S** (metassiltitos e metarritmitos com intercalações carbonáticas), **A** (ardósias), **R₃** (metarritmitos com predominância de corpos arenosos), **Q₃** (quartzitos finos a médios), **R₄** (metarritmitos com predominância da fração pelítica) e **PPC** (metassiltitos e metargilitos com lentes de metacalcários e canais quartzíticos).

Os trabalhos de Teixeira & Danni (1978) e Pimentel *et al.* (1992 e 1995), dentre outros, fornecem informações sobre o Grupo Araxá. No Distrito Federal é composto por clorita xistos, muscovita-quartzo xistos, biotita-muscovita xistos raramente granadíferos, além de ocasionais lentes e intercalações de quartzitos micáceos finos.

O Grupo Bambuí foi estudado por Dardenne (1978ab, 1979 e 1981) e representa um conjunto essencialmente pelito-carbonatado composto por metargilitos, metafolhelhos, metassiltitos argilosos, calcários e dolomitos, com sucessão de arcóseos no topo. No Distrito Federal ocorrem sedimentos dobrados correlacionáveis com as formações Serra da Saudade e Três Marias (Freitas-Silva & Campos 1998).

Solos Os solos correspondem predominantemente à classe dos latossolos (54 % da área do Distrito Federal), seguidos pelos cambissolos (31 %) e solos com horizonte B textural (4 %), além de outras classes distribuídas em menores proporções, tais como neossolos flúvicos, neossolos quartzarênicos, gleissolos e plintossolos (Embrapa 1978, Martins 1998, Martins & Baptista 1998). A tabela 1 reúne as principais classes referidas e suas características.

Geomorfologia Novaes Pinto (1987 e 1994) delimitou três domínios geomorfológicos (macro-unidades A, B e C) que englobam 13 unidades. A macro-unidade "A" está associada à Região de Chapada, abrange 34% da área do Distrito Federal com cota altimétrica acima de 1000m, sendo caracterizada por relevo plano a suave ondulado. A macro-unidade "B" apresenta-se associada à Região de Dissecação Intermediária, com relevo fracamente dissecado abrangendo cerca de 31% do Distrito Federal. A macro-unidade "C" é relativa à Região Dissecada de Vale, associada a depressões ocupadas pelos rios da região, abrangendo aproximadamente 35% do Distrito Federal.

Martins & Baptista (1998) elaboraram um zoneamento geomorfológico com cinco compartimentos: os Planaltos (podendo ser relacionados ao Domínio da Região de Chapadas de Novaes Pinto 1994), os Planos Intermediários (equivalentes em parte ao domínio da Área de Dissecação Intermediária), Planícies (semelhante ao Domínio da Região Dissecada de Vales), regiões de Rebordos (declividades < 20%) para discriminar zonas de transição entre compartimentos, e as regiões de Escarpas (declividades > 45%) caracterizadas pela quebra abrupta do relevo.

Clima O clima do Distrito Federal é marcado pela forte sazonalidade, com dois períodos distintos bem caracterizados. No período entre maio e setembro a taxa de precipitação é baixa, com pouca nebulosidade, alta taxa de evaporação e umidades relativas diárias muito baixas. O período entre outubro e abril apresenta padrão contrastante, sendo que 47% da precipitação anual se

Tabela 1 - Classes de solos mais frequentes na região do Distrito Federal (modificado de Souza 2001). * No caso dos latossolos o regolito (solo + saprolito) pode alcançar 50 metros de espessura.

Classe	Característica	Distribuição espacial	Espessura
Latossolos	Horizonte B latossólico com textura argilosa média, enriquecido em sesquióxidos. Ocorrem associações de vermelho, vermelho-amarelo e amarelo.	Predominantes nas Regiões de Chapadas. Ocorrem também nas Regiões de Dissecção Intermediária.	Até 25 metros com média de 15 metros. (*)
Cambissolos	Presença de B câmbico (pouco desenvolvido).	Predominantes nas Regiões Dissecadas de Vales. Associados a relevos com declives moderados a elevados.	Em geral menor que 70 centímetros. O saprolito pode alcançar mais de 15 metros.
Argissolos e Nitossolos	Presença de B textural com textura argilosa média. Apresentam agregados granulares a subangulosos, pequenos a médios.	Principalmente na Região de Dissecção de Vales na bacia do Rio Maranhão.	Comumente da ordem 10 metros.
Plintossolos	Presença de horizontes ricos em plintita ou petroplintita.	Principalmente na Região de Dissecção Intermediária da Depressão do Paranoá.	Não superior a 5 metros.

concentra no período de novembro a março.

Em função das variações de altitude e das temperaturas médias entre os meses frios e quentes, podem ocorrer no Distrito Federal, segundo a classificação climática de Köppen (CODEPLAN 1984), climas do tipo: Tropical Aw, Tropical de Altitude Cwa e Tropical de Altitude Cwb.

A precipitação média anual é da ordem de 1500 mm. As menores médias pluviométricas anuais ocorrem na porção leste (com isoietas de 1.200 mm) e as mais elevadas estão concentradas em faixas nas porções NW e SW do Distrito Federal (onde estão distribuídas isoietas de 1600 mm).

Hidrogeologia do Distrito Federal No Distrito Federal, com geologia caracterizada por rochas metamórficas recobertas por expressivas coberturas pedológicas, diferenciam-se dois grandes conjuntos de reservatórios, configurando os aquíferos do Domínio Poroso e do Domínio Fraturado (Campos 2004). O primeiro grupo acima referido foi subdividido em quatro sistemas **P₁**, **P₂**, **P₃** e **P₄** e é representado no Distrito Federal pelos solos, mantos de alteração das rochas e materiais acumulados nos sistemas de drenagem (aluviões). O segundo grupo é representado por domínios rochosos caracterizados pela inexistência ou presença reduzida de porosidade primária. Nesse caso os reservatórios de água estão associados a fendas, fissuras, fraturas e falhas (porosidade secundária planar).

Campos & Freitas-Silva (1998) dividiram os aquíferos do Domínio fraturado, para o Distrito Federal, em quatro sistemas relacionados às divisões geológicas, caracterizando os sistemas aquíferos Paranoá, Canastra, Bambuí e Araxá. Ainda dentro desse contexto, o sistema Paranoá foi subdividido nos subsistemas **S/A**, **A**, **Q₃/R₃**, **R₄** e **PPC**; e o sistema Canastra foi subdividido nos subsistemas **F** e **F/Q/M**, também correlacionados a variações na geologia da região.

SUBSÍDIOS PARA ELABORAÇÃO DOS MODELOS Os

modelos propostos foram elaborados com base em observações *in situ* em diversas localidades do Distrito Federal. Alguns locais foram determinantes na aquisição de dados, quando da construção de obras de engenharia.

Poços tubulares profundos são importantes fontes de dados para o entendimento das características hídricas da região. O material proveniente do subsolo compõe a amostragem de calha que fornece informações quanto ao tipo de solo, espessura do regolito, tipo de rocha subjacente e presença de fraturas. Essas obras se encontram distribuídas por toda a região, principalmente nas zonas de grande crescimento populacional como nos condomínios residenciais, onde o abastecimento é feito essencialmente por água subterrânea.

Os resultados de ensaios de bombeamento desenvolvidos em poços tubulares profundos também foram utilizados como ferramentas para o entendimento do comportamento hídrico local, com base em dados de níveis estático e dinâmico, profundidades de entrada d'água, vazão do meio poroso, vazão do meio fraturado e determinação dos parâmetros hidrodinâmicos como condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento.

A instalação de 50 piezômetros na bacia do Rio Jardim (leste do Distrito Federal) foi de suma importância para o entendimento e proposição dos modelos, uma vez que a perfuração até a interface solo-rocha e em alguns casos até a rocha fresca permitiu acesso direto aos diferentes aquíferos presentes na região.

Também se avaliaram ensaios de infiltração *in situ* realizados em diversas classes de solos para estabelecer as variações da condutividade hidráulica vertical (Kv) do meio.

Estudos hidrogeológicos clássicos (medidas de vazões em córregos e nascentes) forneceram dados sobre a contribuição de águas dos aquíferos intergranulares rasos e os fraturados profundos.

Outros estudos realizados em áreas específicas, incluindo ensaios de traçadores e avaliação hidrológicas de bacias

protegidas também contribuíram com dados importantes.

DESCRIÇÃO DOS MODELOS CONCEITUAIS

Modelo das duas superfícies potenciométricas Este modelo foi proposto por Campos & Freitas-Silva (1998) e abordado em trabalhos posteriores por Lousada (1999), Campos & Tröger (2000), Souza (2001) e Cadamuro *et al.* (2002) na região do Distrito Federal. O modelo é aplicável em áreas no interior das chapadas elevadas, caracterizadas pela presença de solos bem desenvolvidos (latossolos), com regolitos que atingem profundidades de até 50 metros sobre rochas intensamente fraturadas com elevado grau de interconexão entre as fraturas.

O “Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas” considera que existe uma zona não saturada entre a base do domínio poroso saturado e o topo da zona representada pelas fraturas saturadas (fig. 1).

O topo do aquífero fraturado é coincidente ao dos metassedimentos frescos, onde os planos de descontinuidades como juntas, falhas e diáclases compõem os reservatórios. No limite entre a rocha fraturada e o saprolito há estreitamento da abertura das fraturas em função do acúmulo de argilas que migram por translocação vertical. No período em que a carga hidráulica no aquífero poroso não é suficiente para quebrar a barreira hidráulica estabelecida, o topo do meio fraturado apresenta-se não saturado. As fraturas podem permanecer secas ou parcialmente saturadas até a profundidades que variam entre 50 e 75 metros. A partir deste patamar as fraturas são permanentemente saturadas por água.

A barreira hidráulica presente na interface dos dois aquíferos, não permite o fluxo contínuo por gotejamento entre estes. Na região de interconexão dos aquíferos coexistem simultaneamente fatores que auxiliam no desenvolvimento da barreira hidráulica, com destaque para:

Figura 1 – Modelo esquemático do Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas. Situação presente no interior da Região de Chapadas Elevadas com relevo plano e de topografia elevada. SPMP – superfície potenciométrica do meio poroso; SPMF - superfície potenciométrica do meio fraturado. Espessura média do regolito – 40 metros; profundidade média da SPMF – 70 metros; poço tubular com profundidade de 150 metros e poço escavado com profundidade de 20 metros.

- presença de material fino (argila e silte) que limita a abertura das fraturas;
- presença de forças capilares pela presença de ar na porosidade planar secundária;
- presença de anisotropia e heterogeneidade do sistema fraturado.

A recarga do meio fraturado se dá após uma elevação da carga hidráulica no meio poroso que permita a ruptura da barreira hidráulica e a passagem de água do meio superior para as fraturas na rocha fresca. Nos meses mais chuvosos do ano, quando o nível freático alcança a máxima elevação, pode haver a junção das zonas saturadas dos domínios poroso e fraturado, entretanto na maior parte do ano, há a separação por uma zona de fraturas não saturada. Nestas condições dois níveis potenciométricos livres podem ser medidos.

A composição química das águas dos dois sistemas é diferente. Os resultados de análises em campo mostram que as águas do domínio intergranular são mais ácidas, com menor total de sólidos dissolvidos, menor condutividade elétrica e possivelmente mais jovens que as águas amostradas em poços tubulares profundos após várias horas de bombeamento contínuo.

O modelo proposto é baseado em uma série de observações empíricas realizadas durante a construção de poços tubulares e exploração dos aquíferos situados na região do Distrito Federal e Entorno. A maior parte das informações foi obtida de poços tubulares profundos, pelo monitoramento da descarga e qualidade das águas de nascentes, pela avaliação do comportamento de balanços hídricos em pequenas bacias hidrográficas e monitoramento da variação dos níveis freáticos em diferentes aquíferos.

A seguir são apresentados e discutidos os principais argumentos que suportam o modelo proposto:

a) Durante a perfuração de poços tubulares é comum a perda de água quando as primeiras fraturas em rocha fresca são interceptadas. A água presente na zona de saturação dos solos/saprolitos migra para as fraturas não saturadas. Abaixo de 50 a 75 metros todas as fraturas interceptadas são saturadas com água, o que resulta no aumento progressivo da vazão do poço.

b) A avaliação da potenciometria de poços tubulares profundos totalmente revestidos na seção dos solos e saprolitos mostra níveis d'água mais baixos que o nível freático de poços rasos situados a pequenas distâncias.

c) A exploração da água em poços rasos presentes no domínio poroso não sofre interferências de rebaixamento em áreas onde existe grande densidade de poços tubulares que bombeiam águas de zonas fraturadas profundas. Este fato mostra que não há conexão hidráulica direta entre os dois aquíferos.

d) Presença de cavernas vadasas onde muitos poços rasos exploram águas do aquífero freático raso, na região de São Sebastião. As cavernas não saturadas são relacionadas a lentes de mármores e verificadas a profundidades entre 36 e 70 metros. Os poços tubulares profundos situados nessas regiões, exploram cavernas saturadas situadas a maiores profundidades e mesmo bombeando dezenas de metros cúbicos por hora não há interferências nos níveis d'água dos poços rasos.

e) A avaliação sobre as variações de vazões em nascentes também corrobora o modelo. Cadamuro (2002) pesquisou dois conjuntos de nascentes em um platô elevado na região do Distrito Federal (Chapada da Canastra) e mostrou que há uma diferença importante no comportamento das variações da descarga de nascentes. As nascentes de contato no meio poroso apresentam

aumento de vazão um mês após o início do período chuvoso. As nascentes de fratura, situadas nas áreas de afloramentos rochosos, registram esse aumento de 45 dias a dois meses após o início das chuvas. Esse comportamento sugere que a recarga do meio fraturado sofre um retardo em função da necessidade do aumento da carga hidráulica do meio aquífero sobreposto para iniciar a transmissão de água.

f) Outro argumento hidrológico foi considerado por Souza (2001) durante o monitoramento da Bacia do Córrego Cabeça de Veado, na porção central do Distrito Federal. Os pontos para medição da vazão foram distribuídos em áreas com solos espessos e em áreas com exposições rochosas a jusante da bacia. Na região onde ocorrem solos espessos o fluxo de base é responsável por um aumento da vazão com o progressivo aumento da área da bacia. Nas áreas de exposição rochosa há a manutenção das vazões mesmo com aumento significativo da área da bacia de drenagem.

Modelo fissuro-cárstico Este modelo pode ser aplicado em várias regiões do Distrito Federal, principalmente no norte, onde ocorrem as lentes de rochas carbonáticas do Grupo Paranoá.

A denominação de modelo fissuro-cárstico se refere aos reservatórios subterrâneos onde as condições de circulação não são do tipo fissural (fraturada) com fluxo laminar, nem do tipo cárstico clássico, onde o fluxo turbulento é predominante. Essa feição é decorrente da interdigitação de lentes carbonáticas com rochas de baixa permeabilidade, o que não permite o desenvolvimento de intensa dissolução cárstica, uma vez que o fluxo lateral é limitado nos metassiltitos e filitos. Assim o modelo fissuro-cárstico inclui aquíferos com dois tipos de porosidades distintas: secundária planar e secundária por dissolução. A figura 2 mostra a representação esquemática para o referido modelo.

Do ponto de vista da hidrogeologia local, esses sistemas apresentam condições bastante favoráveis no que se refere ao potencial aquífero. As fraturas horizontais e subhorizontais tendem a elevar a condutividade hidráulica do meio e atuar como conectores entre as lentes de mármore que se encontram normalmente saturadas.

Os sistemas fissuro-cársticos podem ser, exclusivamente em função do relevo, associados a uma ou duas superfícies potenciométricas. Em áreas de topografia plana com solos espessos são identificadas duas superfícies potenciométricas. Em regiões de relevo movimentado com grande amplitude de cotas e solos rasos, ocorre apenas uma zona de saturação em rocha carbonática (fig. 2).

Como há limitação do fluxo lateral em função da presença de rochas pouco fraturadas, a recarga é eminentemente a partir de fluxo vertical. Esses aquíferos são os mais anisotrópicos e heterogêneos observados na região, pois além da anisotropia condicionada pelas diferentes direções de fraturamento, há ainda as variações laterais nas aberturas da dissolução cárstica.

A ampla anisotropia desses sistemas é materializada pelas variações de vazões dos poços tubulares perfurados, com vazões específicas variando de zero até valores superiores a 18 m³/h/m (o "Poço da Igreja" na cidade de São Sebastião apresentou uma vazão de 114 m³/h com um rebaixamento de apenas seis metros).

Modelo de superfície potenciométrica única com confinamento

Nesse modelo de armazenamento e circulação de água subterrânea também se considera a presença de dois meios de comportamentos distintos: aquíferos porosos recobrendo sistemas fraturados (fig. 3). O meio intergranular superficial é representado por solos rasos

(cambissolos e neossolos litólicos) e saprolitos relativamente espessos (até 20 metros), comumente desenvolvidos de rochas pelíticas.

O aquífero superior é classificado como Sistema P₄ (Campos & Freitas-Silva 1998 e Campos 2004) e para esse caso específico, não apresenta zona de saturação, funcionando como camada confinante do tipo aquítarde.

O aquífero inferior tem comportamento de fluxo laminar em porosidade secundária planar onde as águas armazenadas apresentam diferentes graus de confinamento. Dessa forma tais sistemas aquíferos fraturados tem comportamento artesianos, o que é corroborado pela presença de poços artesianos em situações de relevos mais movimentados.

Esse modelo é observado em locais de relevo forte ondulado, com rochas pelíticas recobertas por solos pouco desenvolvidos.

As observações que suportam a proposição desse modelo são levantadas durante a escavação de poços rasos e instalação de piezômetros em cambissolos de bordas de chapadas. No primeiro caso, a progressão da escavação passa rapidamente dos horizontes superficiais para o saprolito (geralmente argiloso de coloração rosada) sem a presença de água até que se inicia a perfuração em material rochoso pouco alterado ou fresco. Os primeiros registros da presença de água só aparecem quando a escavação já se dá em material litificado. O nível d'água no poço eleva em média 10 metros após a interceptação da zona saturada.

O mesmo comportamento é observado durante a instalação de piezômetros e poços de observação nesse meio. A ação do ar comprimido utilizado na perfuração evidencia a condição seca, sem presença de indício algum de umidade no pó de material expelido a profundidades maiores que 20 metros em alguns casos, mesmo onde já se intercepta material rochoso fresco, de tonalidade esverdeada ou acinzentada. A partir de maiores profundidades percebe-se a presença de umidade, amenizando o aspecto de pó seco expelido. O nível d'água resultante é sempre superior à

Figura 2 – Representação esquemática do Modelo Fissuro-cárstico. Notar a possibilidade da presença de uma ou duas superfícies potenciométricas em função das variações do relevo. Modelo exclusivamente observado onde lentes de rochas carbonáticas interdigitam com rochas menos permeáveis. SPMP – superfície potenciométrica do meio poroso; SPMF - superfície potenciométrica do meio fraturado.

profundidade final de perfuração do poço.

A recarga da água que alimenta as fraturas se dá pelo gotejamento a partir do aquítarde (Sistema P_4) e ainda pelo fluxo lateral de águas infiltradas nas áreas planas e elevadas que se distribuem nas adjacências. Esse modelo de circulação mostra a importância das áreas de chapadas, planas e com solos espessos, para a regularização dos aquíferos fraturados da região dos cerrados.

Nas áreas onde a circulação nos aquíferos segue esse modelo de fluxo verificam-se, no período chuvoso, várias nascentes de contato e de depressão intermitentes. Esse fato mostra que as águas que infiltram pelo aquífero superficial são, em grande parte, descarregadas por fluxo interno e não contribuem efetivamente para a recarga das zonas de fraturas presentes em zonas mais profundas.

Modelo de Superfície Potenciométrica Única sem Confinamento

Esse modelo representa a forma de circulação mais simples e que ocorre na maior parte das áreas onde aquíferos anisotrópicos de natureza fissural são recobertos por espessos solos. Nesse caso todo o conjunto de porosidade intergranular e secundária planar permanece saturado de água na faixa compreendida entre a base do aquífero e o nível freático.

A única superfície potenciométrica presente nessa proposta pode ocorrer permanentemente no domínio poroso superior ou migrar no período de recessão da precipitação pluvial para o domínio fraturado. Na maior parte dos casos a superfície potenciométrica oscila dentro do aquífero poroso superior (figura 4). Nas situações próximas a quebras de relevo (principalmente onde solos arenosos recobrem quartzitos intensamente fraturados), a superfície potenciométrica oscila entre o solo e a rocha em função da distribuição temporal das chuvas (figura 5).

O referido modelo conceitual é observado em áreas de relevo suave ondulado com cotas intermediárias e em regiões próximas a quebras de relevo.

Figura 3 – Modelo de Superfície Potenciométrica com confinamento. A camada de saprolito funciona como aquítarde. Modelo aplicável onde saprolitos argilosos ocorrem sobre terrenos de relevo movimentado. SPMP – superfície potenciométrica do meio poroso; SPMF – superfície potenciométrica do meio fraturado.

A recarga se dá principalmente por fluxo vertical de águas de precipitação e a descarga em nascentes de contato e depressão difusas que alimentam diretamente a drenagem superficial. Essas áreas de exutórios comumente são associadas a gleissolos e outros solos hidromórficos em geral encontrados nas cabeceiras dos córregos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS Os modelos hidrogeológicos propostos foram baseados em estudos hidrogeológicos básicos e observações em campo, principalmente quando da perfuração de poços tubulares profundos nos diversos ambientes discriminados na região. Tais observações forneceram informações sobre os tipos

Figura 4 – Modelo de Superfície Potenciométrica sem confinamento, onde a superfície de saturação permanece no meio aquífero intergranular superior. SPMP – superfície potenciométrica do meio poroso; SPMF – superfície potenciométrica do meio fraturado.

Figura 5 – Ilustração do Modelo de Superfície Potenciométrica sem confinamento. Nesse caso, o nível freático apresenta ampla oscilação anual e pode ser observado em solo ou rocha fresca. Condição comum quando ocorrem quartzitos em bordas de chapadas.

pedológicos, geologia, níveis freáticos, direções de fluxo, comportamento de zonas saturadas e não saturadas, vocação hidrogeológica das rochas, os quais, reunidos, subsidiaram a elaboração dos modelos.

Os modelos são aplicados em diferentes áreas do Distrito Federal, associados principalmente aos solos, tipo de rocha e geomorfologia, porém, em alguns locais com características semelhantes, pode-se verificar divergências decorrentes da anisotropia do meio.

As respostas em relação à precipitação, tanto no domínio poroso quanto no fraturado, são diferentes até para o mesmo ambiente hidrogeológico (por exemplo, quartzitos de borda e centro de chapada). A pedogênese atuante nos quartzitos de bordas de chapadas resulta em solos de textura essencialmente arenosa, os quais têm comportamento mais condutivo, identificando-se elevações e descidas rápidas dos níveis dos poços construídos nesse ambiente. Para os quartzitos de centro de chapada as respostas às taxas pluviométricas são mais lentas, por desenvolverem solos mais espessos e de composição diversa, aumentando assim a anisotropia do meio.

O conhecimento de modelos conceituais é importante para a caracterização das formas de circulação, recarga e descarga dos aquíferos. No caso de aquíferos fraturados sobrepostos por diferentes tipos de solos, esses modelos são fundamentais para o gerenciamento adequado dos sistemas de captação, desenhos construtivos dos poços, aplicação de projetos de recarga artificial, caracterização dos perímetros de proteção dos sistemas de captação e caracterização da sustentabilidade da exploração das

águas subterrâneas.

Algumas distorções em modelos matemáticos aplicados aos aquíferos fraturados podem ser explicadas em função do uso de modelo conceitual inadequado ao sistema estudado.

É importante salientar que os modelos propostos não são aplicáveis a qualquer situação onde aquíferos fraturados ocorrem recobertos por coberturas de solos e saprolitos, mas que cada modelo ocorre em situação pedológico-geomorfológica específica. O modelo das duas superfícies potenciométricas ocorre exclusivamente no interior das chapadas elevadas onde solos e regolitos espessos sobrepõem rochas moderadamente fraturadas (fraturas com abertura média de 0,1 a 4 mm). O modelo de única superfície potenciométrica com confinamento apenas é observado em regiões de relevo movimentado onde saprolitos espessos e argilosos recobrem rochas fraturadas. O modelo de única superfície potenciométrica sem confinamento representa o modelo mais comumente distribuído em situações geomorfológicas mais diversas, e o modelo fissuro-cárstico se desenvolve em situações onde as rochas carbonáticas não compõem camadas contínuas, mas ocorrem na forma de lentes interdigitadas a rochas menos permeáveis (siltitos, folhelhos ou filitos).

Para a confirmação dos modelos empíricos propostos sugere-se a aplicação de estudos hidrogeológicos, hidroquímicos e hidrológicos com destaque para avaliação química isotópica para os elementos $d^{18}O$, Deutério, CFC's, Trítio e ^{14}C ; estudos de monitoramento automáticos de níveis potenciométricos em poços especificamente construídos; aplicação de estudos de traçadores químicos e monitoramento hidrológico de bacias preservadas.

Referências

- Cadamuro A.L., Campos J.E.G., Tröger U. 2002. Artificial recharge in fractured rocks – an example from the Federal District of Brazil for the sustainability of the system. In: Dillon, P. Management of Aquifer Recharge for Sustainability, Proc. of 4th International Symposium on Aquifer Recharge, Balkema, pp. 523-526.
- Campos J.E.G. 2004. Hidrogeologia do distrito Federal: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Rev. Bras. Geoc.*, 1:41-48.
- Campos J.E.G. & Freitas-Silva F.H. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA / SEMATEC / UnB. Parte IV. 85p.
- Campos J.E.G. & Tröger U. 2000. Groundwater Occurrence in Hard Rocks in the Federal District of Brasília A Sustainable Supply?. In: Sililo, Groundwater: Past Achievements and Future Challenges, Proc. of XXX I.A.H. Congress. Cape Town, South Africa, Balkema, pp. 109-113.
- CODEPLAN. 1984. Atlas do Distrito Federal. Brasília. Secretaria do Governo/Secretaria da educação e Cultura/CODEPLAN. v. 1. 78p.
- Dardenne M.A. 1978a. Geologia da Região de Morro Agudo (Minas Gerais). Bol. Inform. SBG/Centro Oeste, 7-8:68 – 84.
- Dardenne M. A. 1978b. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congr. Bras. Geoc., 30. Recife, 1978. Anais, SBGv. 2. p. 597-610.
- Dardenne M. A. 1979. *Les minéralisations plomb, zinc, fluor du Proterozoïque Supérieur dans le Brésil Central*. Paris. Univ. Pierre et Marrie Curie - Paris VI. 251p. These de Doctorat d'Etat.
- Dardenne M. A. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. In: Simp. Sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais.
- EMBRAPA. 1978. Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Boletim Técnico. Nº 53. SNLCS. Rio de Janeiro. 455 p.
- Faria A. 1995. *Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D'Alcântara-Alto Paraíso de Goiás*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 199p.
- Freitas-Silva F.H. & Dardenne M.A. 1994. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás. In: Simp. Geol. Centro Oeste., 4. Brasília, 1991. *Anais...*Brasília, SBG-DF/CO, p.164-165.
- Freitas-Silva F.H. & Campos J.E.G. 1998. Geologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA / SEMATEC / UnB. Parte I. p. 1-86p.
- Lousada E.O. 1999. *Estudos Geológicos e Geofísicos Aplicados a Localização de Poços Tubulares Profundos em Aquíferos Fraturados na Região do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Instituto de

- Geociências, Universidade de Brasília. 104p.
- Martins E.S. & Baptista G.M.M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília: IEMA / SEMATEC / UnB. Vol 1. p 89 – 137.
- Martins E. S. 1998. *Petrografia, mineralogia e geomorfologia de regolitos lateríticos no Distrito Federal*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 196p.
- Novaes Pinto M. 1987. Superfícies de aplainamento do Distrito Federal. *Rev. Bras. Geogr.*, **49**:9-26.
- Novaes Pinto M. 1994. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: M. Novaes Pinto (org). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Brasília. Editora UnB. 2ª ed.. p. 285-320.
- Pimentel M.M., Fuck R.A., Dardenne M.A., Del'rey Silva L.J.H., Meneses P.R. 1995. Magmatismo ácido peraluminoso associado ao Grupo Araxá na região entre Pires do Rio e Ipameri, Goiás: características geoquímicas e implicações geotectônicas. In: SBG, Simp. Geol. Centro-Oeste, 3, Goiânia, *Anais...*, p.68-71.
- Pimentel M.M., Heaman L., Fuck R.A. 1992. Idade do metariolito da Sequência Maratá, Grupo Araxá, Goiás: estudo geocronológico pelos métodos U-Pb em zircão, Rb-Sr e Sm-Nd. *An. Acad. Bras. Cien.* **64**:19-28.
- Rosen L. & Legran H.E. 2000. Systematic makings of early stage hydrogeologic conceptual models. *Groundwater*, **38**:887-893.
- Souza MT. 2001. *Fundamentos para gestão dos recursos hídricos do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 94p.
- Teixeira N.A. & Danni J.C.M. 1978. Contribuição a estratigrafia do Grupo Araxá na região de Passos, MG. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, Recife, 1970. *Anais ... Recife*, Vol. 3 p.700-711.

Manuscrito A-1571

Recebido em 26 de fevereiro de 2005

Revisão dos autores em 10 de agosto de 2005

Revisão aceita em 22 de agosto de 2005