

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA OCORRÊNCIA DE AQUÍFERO TERMAL NO DISTRITO FEDERAL

José Eloi Guimarães CAMPOS¹ & Luciano Soares da CUNHA¹

(1) Universidade de Brasília, Instituto de Geociências. Campus Darcy Ribeiro - Asa Norte. CEP 70910-970. Brasília/DF. Endereços eletrônicos: eloi@unb.br; lucianosc@unb.br.

- Introdução
- Caracterização do meio físico local
 - Clima
 - Geologia
 - Filitos - Grupo Canastra
 - Formação Ribeirão do Torto - MNPPa
 - Formação Serra da Meia Noite - MNPPr3
 - Formação Ribeirão Contagem - MNPq3
 - Formação Córrego do Sansão - MNPPr4
 - Coberturas Regolíticas
- Hidrogeologia
 - Descrição dos Aquíferos
 - Domínio Intergranular
 - Domínio Fraturado
- Resultados e discussões
 - Caracterização dos Sistemas de Fraturas
 - Modelo Conceitual de Fluxo
 - Condicionantes do Artesianismo e do Termalismo
 - Datação das Águas
 - Método
 - Resultado
- Considerações finais e conclusões
- Referências

RESUMO - Esta pesquisa objetivou determinar as causas do aquecimento das águas termais recentemente descobertas no sul do Distrito Federal. A temperatura da água é de 28,9°C, obtida em poço artesiano jorrante com profundidade de 150 m e vazão de 250 m³/h, sendo classificada como água mineral hipotermal na fonte. A pesquisa consistiu da caracterização física da área, comparando dados regionais já conhecidos com dados localmente obtidos. Na área em estudo ocorrem tipos litológicos atribuídos às formações Ribeirão do Torto, Serra da Meia Noite, Ribeirão Contagem e Córrego do Sansão do Grupo Paranoá, filitos do Grupo Canastra, além de coberturas representadas por latossolos e pequenas ocorrências de outros solos. A região está inserida na borda sul do Domo Estrutural de Brasília com mergulho da envoltória das camadas para sul/sudeste. Na região ocorrem aquíferos fraturados associados aos sistemas Paranoá e Canastra, sendo as águas aquecidas associadas ao Subsistema **R₃/Q₃**. A partir da relação destes dados com conceitos de fluxo da água subterrânea em meios fraturados discutiu-se um modelo conceitual para explicar a elevação da temperatura da água acima da média regional, sendo este o único caso conhecido de água termal no Distrito Federal. Neste modelo os principais condicionantes para a ocorrência de água aquecida são: o fluxo regional da água subterrânea, gradiente geotérmico e existência de fraturas abertas a profundidade mínima de 300 m.

Palavras-chave: Hidrotermalismo, aquífero fraturado, gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT - The aim of this research is the determination of the causes of heating of thermal waters in the south of the Federal District, Brazil. The temperature of the water is 28.9°C, obtained in an artesian well with 150 m depth and 250 m³/h discharge, classified as hypothermal. The research included the physical characterization of the area, comparing regional data with the local environment. In the study area the rocks types are correlated to the Ribeirão do Torto, Serra da Meia Noite, Ribeirão Contagem and Córrego do Sansão formations of the Paranoá Group, fillite of the Canastra Group, and soil cover represented by oxisol and small occurrences of other soil types. The region is situated in the south border of the Brasilia Structural Dome where the axis of the main fold and rock layers dips to southeast - south. In the region there are fractured aquifers associates to the Paranoá and Canastra systems and the warm groundwater are associates to **R₃/Q₃** Subsystem. By the integration of these data with concepts of groundwater flow in fractured aquifers, a possible conceptual flow model to explain the higher temperature of the water (with comparison to the regional), where this is the only known thermal water case in the Federal District. In this model, the main conditionings for the thermal water occurrence are the regional water flow, geothermal gradient and the existence of open fractures and faults at least up to 300 m depth.

Keywords: hydrothermalism, fractured aquifer, water resources management.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas podem apresentar temperaturas anômalas, superiores à média da temperatura da atmosfera em sua área de recarga. O aquecimento das águas subterrâneas pode ser alcançado por dois processos: associação com magmatismo ou por grau

geotérmico. No primeiro caso as águas são aquecidas a partir do calor emanado por intrusões, câmaras magmáticas ou caldeiras vulcânicas. Há também a possibilidade de haver contato entre águas meteóricas e estas estruturas em profundidade. No segundo caso, o

aquecimento se dá sem o vínculo com o calor de estruturas magmáticas em profundidade, mas exclusivamente pelo grau geotérmico vinculado ao gradiente local.

A distinção da origem do aquecimento das águas pode ser realizada pela determinação de corpos magmáticos jovens em profundidade, pela composição química das águas e com uso de geotermômetros específicos. No Brasil há dois casos emblemáticos que exemplificam tipos de hidrotermalismo com origem contrastante: Caldas Novas, em Goiás, em que o aquecimento é vinculado ao grau geotérmico (Campos *et al.* 2005) e Poços de Caldas, em Minas Gerais, em que as águas têm temperaturas anômalas devido ao fluxo de calor oriundo de magmatismo Cretáceo (Cruz & Peixoto 1991).

Diante da inexistência de estudos de caracterização detalhada de aquíferos termais e de vazões anômalas na região sul do Distrito Federal e Entorno torna-se imprescindível a elaboração de diagnósticos confiáveis e de um plano de gestão para a exploração da água subterrânea para fins termais e, para outros usos que demandam elevado consumo (exemplo abastecimento urbano).

No Distrito Federal e Entorno existem poços de elevada vazão (maior que 150 m³/h) apenas na região de São Sebastião, na porção central do DF. Contudo, nesta área ocorrem aquíferos fissuro-cársticos onde as vazões anômalas já são esperadas. Recentemente, um poço exploratório construído no sul do Distrito Federal na divisa com o Goiás, município de Cidade Ocidental (Figura 1), apresentou vazão anômala superior a 250 m³/h com temperatura da água de 28,9°C.

O objetivo dessa pesquisa é a realização de estudos de caracterização hidrogeológica que subsidiarão os planos para a gestão sustentável do aquífero local e regional. O problema está relacionado à própria exploração das reservas hídricas subterrâneas e ao risco de se proceder a sobreexploração do aquífero na área. A exploração dos recursos hídricos subterrâneos sem os devidos estudos de caracterização hidrogeológica pode comprometer a sustentabilidade do sistema.

Foram realizadas análises isotópicas da água quente para se determinar a idade da água e estabelecer o mecanismo de circulação da água no sistema aquífero (recarga e sentido de fluxo).

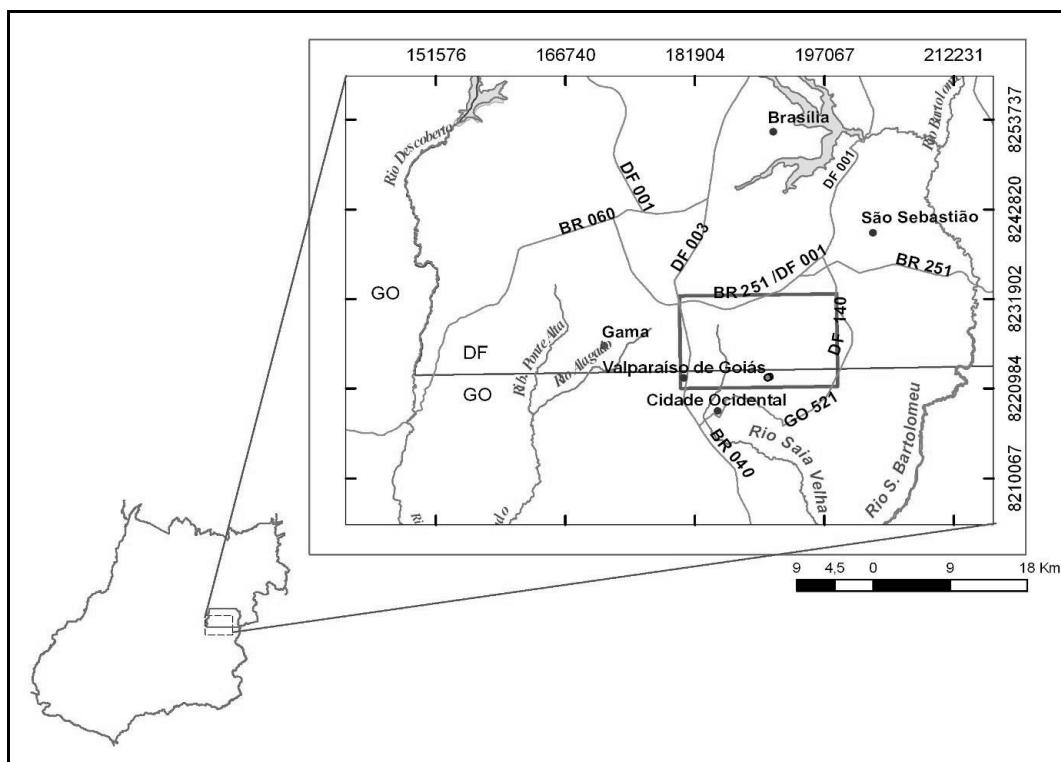


Figura 1. Localização da área de estudo. Área localizada no limite sul entre Goiás e Distrito Federal.

Nesta perspectiva, a partir dos estudos hidrogeológicos pretende-se evitar que ocorram

na região em estudo problemas relacionados à degradação do aquífero termal. Geralmente, os

problemas ligados à exploração de água subterrânea estão relacionados à exaustão das reservas hídricas subterrâneas em função do bombeamento com vazões muito superiores às taxas de realimentação e contaminação devido à infiltração de cargas poluentes. Exemplo clássico do problema de sobreexploração é observado na região sudeste do estado de Goiás (região de Caldas Novas e Rio Quente) onde o bombeamento da água quente sem planejamento vem comprometendo a sustentabilidade do sistema, colocando em risco

a manutenção de toda a estrutura já instalada (clubes, hotéis e pousadas).

No Distrito Federal a ocorrência em estudo é a primeira que pretende explorar este atrativo das águas termais para fins comerciais. Dessa forma ainda é possível planejar a utilização da água, sem comprometer a sustentabilidade do sistema aquífero na região e, principalmente, evitar que o bombeamento da água subterrânea interfira nas nascentes que alimentam a rede de drenagem superficial.

CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO LOCAL

Clima

O clima do Distrito Federal é definido como tropical, com concentração da precipitação pluviométrica no período de verão (entre os meses de novembro e março) e a época seca coincide com os meses de inverno (junho a agosto). A sazonalidade que marca o clima é caracterizada pela continentalidade da região e é associada ao padrão de circulação de massas de ar oriundas da zona tropical, com forte componente nordeste a leste (Baptista 1998). No período de inverno, caracterizado por estabilidade climática e reduzida precipitação, ocorre a inversão térmica por radiação na camada inferior da atmosfera, a qual é responsável pela ocorrência da bruma seca e pela acumulação de fumaça e particulados oriundos das atividades humanas, como, por exemplo, a queimada.

A precipitação anual média dos últimos 30 anos é de 1.500 mm/ano e as isoietas variam de desde 1.600 mm/ano na porção oeste do território até 1.250 mm/ano na região leste.

Geologia

No Distrito Federal e entorno próximo ocorrem conjuntos litoestratigráficos atribuídos aos grupos Paranoá e Canastra (Mesoproterozóica) e Bambuí e Araxá (Neoproterozóica), os quais ocupam respectivamente 65, 15, 15 e 5% da área total do território do DF (Freitas-Silva & Campos 1998 e Campos 2004).

O Grupo Paranoá é representado por uma sequência psamo-pelito-carbonatada, o Grupo Araxá é composto por xistos variados além de lentes de quartzitos finos e micáceos; o

Grupo Canastra é constituído por clorita filitos, quartzo-sericita filitos e metarritmitos associados a lentes de quartzitos e mármores finos e o Grupo Bambuí é caracterizado por metassiltitos argilosos, metargilitos e raras intercalações de camadas arcoseanas (Freitas-Silva & Campos 1998).

Especificamente na área em estudo e adjacências ocorrem tipos litológicos atribuídos às formações Ribeirão do Torto, Serra da Meia Noite, Ribeirão Contagem e Córrego do Sansão do Grupo Paranoá, filitos do Grupo Canastra (Figura 2), além de coberturas de caráter eluvionar compostas por espessos latossolos, além de ocorrências de outros solos. A região está inserida na borda sul do Domo Estrutural de Brasília com mergulho da envoltória das camadas para sul/sudeste.

Grupo Canastra - MNPCz

O Grupo Canastra é caracterizado por clorita filitos, clorita-quartzito filitos e metarritmitos. Quando alterados apresentam cores rosada, amarelada e amarronzada e quando menos intemperizados mostram tons esverdeados. Localmente ocorrem intercalações de quartzitos finos, que por serem mais resistentes à denudação, sustentam o relevo, como é o caso dos morros localizados na região rebaixada do relevo (Freitas-Silva 1991).

Os filitos apresentam foliação principal com direção geral norte-sul e com ângulo de mergulho variável desde subverticais até horizontais. Dobras do tipo *chevrons* apertados ou mais abertos são observadas nos maiores cortes de estradas.

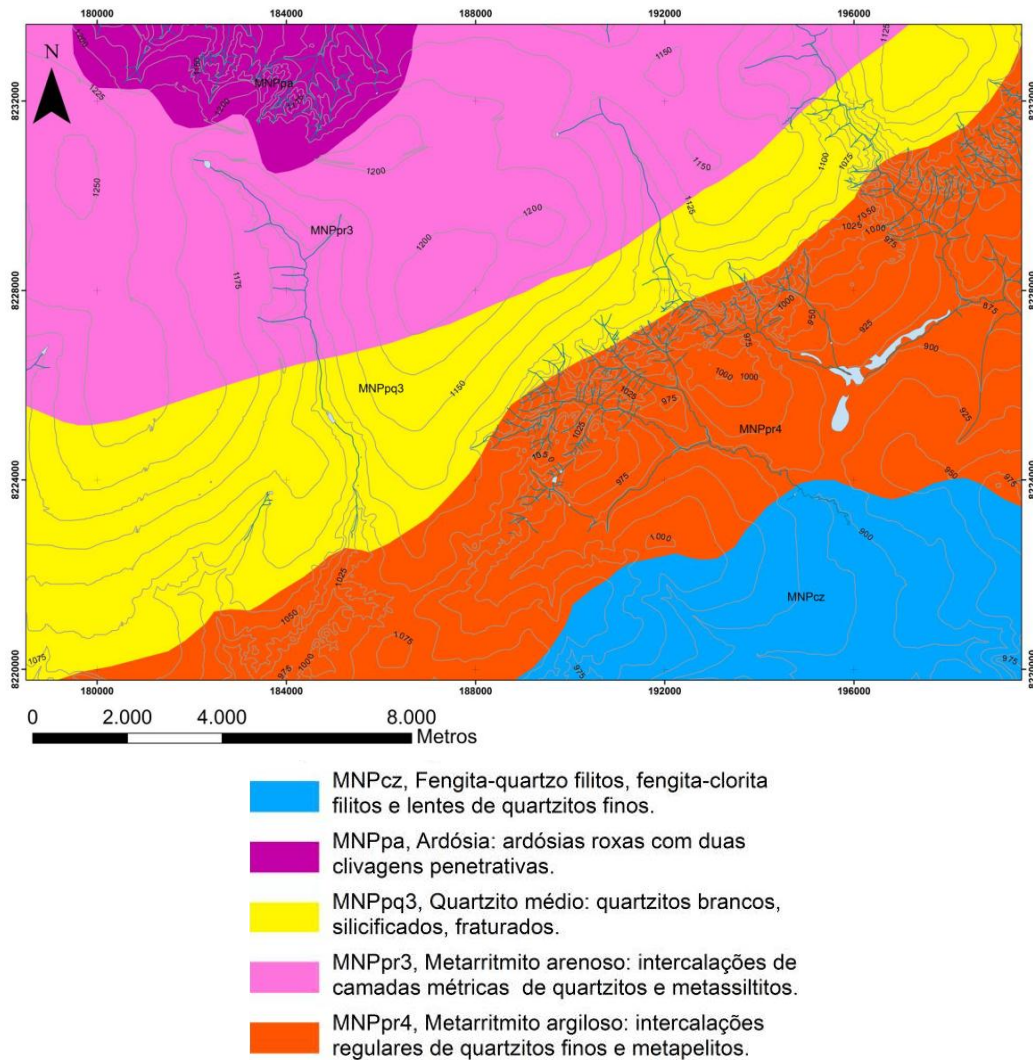


Figura 2. Mapa geológico da área estudada.

Formação Ribeirão do Torto - MNPPa

A Formação Ribeirão do Torto é composta por ardósias de cor cinza quando frescas e roxas quando alteradas, sendo a presença de duas clivagens ardosianas penetrativas a feição mais diagnóstica (Freitas-Silva & Campos 1998).

Estas rochas ocorrem apenas em restrita área na porção noroeste da área estudada em região de maior dissecação da rede de drenagem.

Formação Serra da Meia Noite - MNPPq3

A Formação Serra da Meia Noite é caracterizada pela alternância de estratos milimétricos a métricos de quartzitos (finos a médios), metassiltitos argilosos, metargilitos sílticos e metalamitos. Em função da presença de duas intercalações mais espessas de quartzitos, esta unidade foi dividida em duas subunidades, (Freitas-Silva & Campos 1998): **Inferior** iniciada por um contato gradacional

com as ardósias da formação sotoposta, passando a um aumento progressivo de intercalações de metassiltitos e delgadas camadas de quartzitos, com um espesso nível de quartzito no topo e **Superior** composta por um conjunto de metarritmitos com intercalações de bancos centimétricos de quartzitos e metassiltitos laminados, também culminado com um espesso nível de quartzito ou laminado (Freitas-Silva & Campos 1998).

Na área em estudo estas rochas ocorrem na porção norte da poligonal, onde os afloramentos são apenas restritos aos vales das drenagens.

Formação Ribeirão Contagem - MNPPr3

Os quartzitos desta formação afloram na forma de matacões próximo à quebra de relevo que marca a borda sul da Chapada de Brasília. São representados por quartzitos brancos ou amarelados, silicificados e intensamente fraturados. Nos blocos maiores podem ser

identificadas estratificações cruzadas tabulares e acanaladas. Localmente no interior da chapada podem ocorrer na forma de matacões métricos e exposições *in situ* isoladas. Próximo ao topo e à base desta formação ocorrem intercalações de metarritmitos, os quais são caracterizados pela alternância rítmica de camadas de metapelitos e metapsamitos com ampla predominância dos termos arenosos (Freitas-Silva & Campos 1998).

Próximo à superfície e em zonas de fraturas em maiores profundidades, os quartzitos são avermelhados a arroxeados e, onde são mais maciços, apresentam tons esbranquiçados e amarelados. As melhores exposições foram observadas no Setor Habitacional Tororó (extremo nordeste da área estudada).

Formação Córrego do Sansão - MNPPr4

Os metarritmitos da Formação Córrego do Sansão estão limitados a uma faixa na porção inferior da quebra de relevo que marca a borda da Chapada de Brasília e o início da área de estudo. Na porção basal este conjunto apresenta espessos pacotes de metassiltitos argilosos maciços de cor rosada que passam para colorações esbranquiçadas com a evolução do intemperismo. Em direção ao topo da estratigrafia, ocorre um conjunto rítmico com intercalações centimétricas regulares de quartzitos e metapelitos, com espessuras de 1 a 2 centímetros e apenas localmente superando 20 centímetros (Freitas-Silva & Campos 1998).

Coberturas Regolíticas

Dentro deste conjunto estão enquadrados os solos e regolitos de caráter autóctone que se formaram em função dos processos de intemperismo e denudação, durante o desenvolvimento da penneplanização regional do Distrito Federal no Cenozóico (Novaes Pinto, 1994 e Martins & Baptista 1998).

A gênese destas coberturas está vinculada a processos de laterização, as quais alcançam espessuras maiores que 20 metros, contudo o regolito sobre zonas fraturadas pode superar 40 metros de espessura. O ataque químico é dominado pela intensa lixiviação de filossilicatos, em função do clima com estações chuvosas e secas bem diferenciadas, relevo com

topografia suave, baixo pH das águas de infiltração e presença de zonas fraturadas.

Na área ocorrem latossolos vermelhos, vermelho-amarelos e localmente neossolos quartzarênicos. O contato entre os latossolos e as areias é gradacional. O pacote que inclui os solos e as rochas alteradas (oxidadas) pode ocupar até 100 metros, a partir daí podem ocorrer rochas frescas (geralmente com coloração cinza escuro a preto).

Os solos apresentam textura arenosa com porosidade variável em razão da quantidade de areia no material original. Os solos derivados das porções pelíticas dos metarritmitos são mais vermelhos e argilosos, enquanto os desenvolvidos dos quartzitos ou dos metarritmitos mais arenosos são mais claros e apresentam maior permeabilidade.

Hidrogeologia

O Distrito Federal está situado no limite entre as províncias hidrogeológicas do Escudo Central e do São Francisco. Em ambos os casos a região é amplamente dominada por aquíferos fraturados e físsuro-cársticos recobertos por solos e rochas alteradas com características físicas e espessuras variáveis (que em conjunto compõem sistemas aquíferos intergranulares).

As principais informações sobre a hidrogeologia do Distrito Federal estão disponíveis em Romano & Rosas (1970), Barros (1992), Amore (1994), Mendonça (1993), Campos & Freitas-Silva (1998 e 1999), Zoby (1999), Souza (2001), Cadamuro (2002), Joko (2002), Moraes (2004), Campos (2004) e Lousada (2005).

No Distrito Federal e entorno onde a geologia é caracterizada por rochas metamórficas recobertas por espessos solos, podem ser diferenciados três grandes grupos de aquíferos, que correspondem à classificação maior dos reservatórios subterrâneos de água, Domínio Aquífero Intergranular (ou Poroso), Domínio Aquífero Fraturado e Domínio Aquífero Físsuro-Cárstico. A caracterização mais precisa dos vários sistemas aquíferos no Distrito Federal requer a subdivisão em subsistemas, evidenciando a real diversificação das unidades litoestratigráficas. A Tabela 1 mostra a sinopse do quadro hidrogeológico do Distrito Federal.

DOMÍNIO	SISTEMA	SUBSISTEMA	Vazão Média (m ³ /h)	Litologia/Solo Predominante
Freático	Sistema P ₁	-	< 0,8	Latossolos Arenosos e Neossolos Quartzarênicos.
	Sistema P ₂		< 0,5	Latossolo Argilosos.
	Sistema P ₃			Plintossolos e Argissolos.
	Sistema P ₄		< 0,3	Cambissolo e Neossolo Litólico.
Fraturado	Paranoá	S/A	12,5	Metassiltitos.
		A	4,5	Ardósias.
		R₃/Q₃	12,0	Quartzitos e metarritmitos arenosos.
		R₄	6,5	Metarritmitos argilosos.
	Canastra	F	7,5	Filitos micáceos.
	Bambuú	-	6,0	Siltitos e arcóseos.
	Araxá	-	3,5	Mica xistos.
Físsuro-Cárstico	Paranoá	PPC	9,0	Metassiltitos e lentes de mármore.
	Canastra	F/Q/M	33,0	Calcifilitos, quartzitos e mármore.

Tabela 1. Resumo da classificação dos Domínios, Sistemas/Subsistemas aquíferos do Distrito Federal com respectivas vazões médias. Fonte: Adaptado de Campos & Freitas-Silva (1999). Destacado em negrito os subsistemas presentes na área em estudo.

As vazões dos poços tubulares variam desde zero (poços secos) até mais de 150 m³/h. A ampla variabilidade de potencial dos aquíferos é resposta à grande variação da geologia, tipos de solos e geomorfologia.

Descrição dos Aquíferos

Domínio Intergranular

Os aquíferos do Domínio Intergranular são caracterizados pelos meios geológicos onde a porosidade é do tipo intergranular, ou seja, a água ocupa os poros entre os minerais constituintes do material geológico (rocha ou solo). Na área em estudo esse domínio é essencialmente representado pelos solos e pelo manto de alteração das rochas. A caracterização dos aquíferos desse domínio está vinculada a vários parâmetros, dos quais dois são destacados: a espessura e a condutividade hidráulica (permeabilidade), sendo que ambas são diretamente controladas pela geologia e pelos solos em que cada tipo de aquífero está inserido.

Os resultados mostram que os solos da região apresentam condutividades hidráulicas baixas a muito baixas. Os cambissolos são considerados praticamente impermeáveis, sendo que próximo a 100 cm a condutividade cai para ordem de grandeza de 10⁻⁸ m/s. Os gleissolos pela própria natureza pedogenética

de deficiência de drenagem apresentam valores entre 10⁻⁶ e 10⁻⁷ m/s. Os latossolos e nitossolos da área estudada, em função do grande teor de argila, também apresentam valores baixos. Apenas os latossolos da Chapada e Brasília com textura arenosa apresentam condutividade alta na superfície e moderada em profundidade.

Este quadro mostra que a provável área de recarga apresenta zona não saturada com boas condições de infiltração. Na área estudada os baixos valores de condutividade hidráulica funcionam como um sistema de proteção do aquífero termal, pois, de forma geral os materiais de cobertura apresentam baixa condutividade hidráulica.

Domínio Fraturado

Os aquíferos do domínio fraturado são caracterizados pelos meios rochosos onde os espaços ocupados pela água são representados por descontinuidades planares, ou seja, planos de fraturas, microfraturas, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. Como no Distrito Federal o substrato rochoso é representado por metassedimentos, os espaços intergranulares foram preenchidos durante a litificação e o metamorfismo. Dessa forma, os eventuais reservatórios existentes nas rochas proterozoicas estão incluídos no Domínio Fraturado, onde os espaços armazenadores de

água são classificados como porosidade secundária.

Por estarem restritos a zonas que variam de alguns metros a centenas de metros, os aquíferos do Domínio Fraturado são livres ou confinados, de extensão lateral variável, fortemente anisotrópicos e heterogêneos, compondo o sistema de águas subterrâneas profundas. Com raras exceções, esse domínio está limitado a profundidades pouco superiores a 250 metros sendo que em profundidades maiores há uma tendência de fechamento dos planos de fraturas em virtude do aumento da pressão.

Os parâmetros hidrodinâmicos são muito variáveis em função do tipo de rocha e, inclusive, variando significativamente em um mesmo tipo litológico. O principal fator que controla a condutividade hidráulica dos aquíferos desse domínio é a densidade das descontinuidades do corpo rochoso.

Esses aquíferos são aproveitados a partir de poços tubulares profundos e apresentam vazões que variam de zero até valores superiores a 100 m³/h, sendo que a grande maioria apresenta descarga entre 5 e 12 m³/h. A existência de poços secos é controlada pela variação da fração granulométrica sendo que

quanto maior a concentração de quartzitos maior a produtividade dos aquíferos e quanto maior a presença de material argiloso (metassiltitos e ardósias) maior a ocorrência de poços secos ou de muito baixa vazão.

A classificação desse domínio em quatro conjuntos distintos, denominados de sistemas aquíferos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí é feita com base no contexto geológico, análise estatística dos dados de vazões e feições estruturais.

Na área, o Sistema Paranoá foi subdividido nos seguintes subsistemas: **R₃/Q₃** e **R₄**, enquanto o Sistema Canastra é integrado pelo Subsistema **F** (Campos & Freitas-Silva 1998).

As águas subterrâneas desse domínio apresentam exposição à contaminação atenuada, uma vez que os aquíferos do Domínio Intergranular sobrepostos funcionam como um filtro depurador natural, que age como um protetor da qualidade das águas mais profundas.

A recarga dos aquíferos desse domínio se dá através do fluxo vertical e lateral de águas de infiltração a partir da precipitação pluviométrica. A morfologia da paisagem é um importante fator controlador das principais áreas de recarga regionais.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização dos Sistemas de Fraturas

Como há poucas exposições rochosas na poligonal do condomínio e seu entorno próximo, a avaliação e mapeamento das descontinuidades (sistemas de fraturas) foi realizada em uma área mais ampla, incluindo o vale do córrego Caxeta e parte do vale do rio Saia Velha a oeste.

A metodologia adotada foi a análise macrorregional dos lineamentos estruturais, partindo-se do princípio de que a teoria dos fractais é perfeitamente aplicável ao estudo das descontinuidades estruturais causadas por esforços tectônicos.

O maciço rochoso foi submetido a esforços tectônicos durante o Ciclo Orogenético Brasileiro de idade Neoproterozoica (~600Ma.). Em virtude do comportamento rúptil das rochas da unidade de metarritmitos a dissipação do *stress* compressivo gerou uma série de descontinuidades em direções bastante variadas. De forma geral, o grau de fraturamento foi equivalente entre os diversos

tipos de rochas, contudo o caráter dúctil dos materiais pelíticos leva a uma maior dificuldade de manutenção das fraturas abertas em profundidade. A tendência de fechamento das aberturas em profundidades ocorre pela pressão litostática que tende a aumentar com o aumento da carga.

Na região foram delimitadas duas famílias principais de fraturamento com atitudes gerais: N30W e N60W, subverticais. Essas estruturas controlam a incisão da rede de drenagem local sendo o córrego da Água Quente de direção N60E e seus tributários diretos com direção N30W.

Além destes, ainda ocorrem fraturas subhorizontais com atitudes muito variáveis, as quais não puderam ser sistematizadas em grupos definidos.

As famílias de fraturamento estão relacionadas a origens diversas, em momentos específicos da evolução tectônica, sendo as de direção N10-20E consideradas como fraturas de alívio da extensão principal e as de direção NW

e NE, como fraturas do par conjugado consideradas como fraturas de cisalhamento.

As fraturas abertas podem alcançar até 8 mm de largura, contudo a maioria não supera 2 ou 3 mm de abertura média (observações realizadas na região em estudo e em outras áreas do Distrito Federal).

Modelo Conceitual de Fluxo

A ocorrência de água com temperatura anômala, na área em estudo, é devida exclusivamente ao modelo de fluxo, uma vez que não há anomalias térmicas de origem magmática na região. Para a compreensão do comportamento do fluxo da água subterrânea foram determinados os regimes de fluxo hidrogeológico incluindo sistemas regionais e locais, áreas de recarga e descarga, o controle e influência do sistema fraturado, seu confinamento no condicionamento e explicação do hidrotermalismo.

Fluxo de água subterrânea é a migração da água pela rocha ou solo através de seus poros, que no caso das rochas em estudo são representados por descontinuidades como fraturas, plano de acamamento e foliação. Pode-se definir uma linha de fluxo como o caminho de uma partícula percorrido na água subterrânea. Dessa forma, pode-se analisar e representar espacialmente como é a migração da água subterrânea. Na área estudada, o fluxo da água subterrânea do domínio fraturado ocorre principalmente ao longo do Subsistema R_3/Q_3 , o qual apresenta valores de vazão maiores que o Subsistema R_4 (Tabela 1), que é a litologia aflorante no local em que o poço foi construído.

Hubbert (1940) em uma análise dos parâmetros que controlam o fluxo de água subterrânea, concluiu que o gradiente da carga hidráulica é responsável pelo controle da velocidade, da direção e do sentido do fluxo em um aquífero homogêneo. O mesmo raciocínio pode ser adaptado para sistemas anisotrópicos, em que além do gradiente da carga hidráulica, as direções das anisotropias também apresentam papel relevante. Como o nível d'água subterrânea tende a seguir o padrão do relevo, a declividade topográfica é o principal controle do fluxo. Na área de estudo o aquífero não é homogêneo, mas o relevo também é o principal agente de fluxo, determinando áreas de recarga e descarga e áreas de fluxo local e regional.

No Distrito Federal, as áreas de recarga estão em áreas topograficamente mais elevadas representadas pelas áreas de chapadas. A área de recarga que alimenta o aquífero pelo poço é, portanto, a região de chapada situada na porção norte da área em estudo. O substrato geológico destas áreas é composto principalmente por quartzitos da Unidade Q_3 , o que facilita a formação de solos muito espessos e permeáveis.

A distância da área de descarga em relação à área de recarga define se o fluxo é regional ou local. Fluxo local é o que possui área de descarga próxima à área de recarga. Este possui maior velocidade e depende de alto gradiente topográfico. Fluxo regional possui área de descarga mais distante e menor velocidade devido ao baixo gradiente topográfico (inclinação /distância). O fluxo regional poderia explicar as temperaturas anômalas, pois águas que chegam a profundidades maiores tem temperatura maior devido ao grau geotérmico. Se os poços interceptam zonas de fluxo regional teriam, portanto, água com maior temperatura. A análise na escala de estudo mostra que o comportamento das linhas de fluxo pode ser visto como similar a um modelo em meio isotrópico, uma vez que o Subsistema R_3/Q_3 é um meio fraturado e o fluxo pode estar canalizado em fraturas que alcançam profundidades maiores. Dessa forma, o modelo de linhas de fluxo é tal que o fluxo regional migra para regiões mais profundas em fraturas das unidades R_3 e Q_3 do Grupo Paranoá emergindo novamente canalizado em fraturas conectadas a fraturas da Unidade R_4 .

Outra análise na determinação do regime de fluxo é que águas provindas de fluxo local possuem maior influência de águas meteóricas e são hidroquimicamente muito parecidas com águas da área de recarga. Águas de fluxo regional, porém, estão localizadas em zonas de menor influência da superfície e, além disto, ficam maior tempo em contato com a rocha devido à menor velocidade do fluxo regional. Portanto, estas últimas possuem características hidroquímicas mais influenciadas pela composição da rocha reservatório. Portanto, análises hidroquímicas são uma importante ferramenta na determinação de fluxo local e regional.

Condicionaltes do Artesianismo e do Termalismo

Na área de estudo as litologias são correlacionadas às formações Ribeirão do Torto, Serra da Meia Noite, Ribeirão da Contagem e Córrego do Sansão do Grupo Paranoá. Na Tabela 1 é possível ver que os dois subsistemas de aquífero do domínio fraturado relativo a estas litologias possuem vazões distintas. O Subsistema **R₄** com menor condutividade hidráulica funciona como camada confinante para o subsistema **R₃/Q₃**. Desta forma, poços que estão sobre o Sistema **R₄** e que alcançam profundidades que interceptam fraturas no Subsistema **R₃/Q₃** são jorrantes.

O modelo conceitual de fluxo para a área em estudo é apresentado na Figura 3.

Neste caso o sistema é considerado do tipo *aquífero fraturado artesiano*, em que a água armazenada no Subsistema **R₃/Q₃** é confinada pelos metarritmitos do Subsistema **R₄**, que naturalmente apresentam menor densidade de fraturas e fraturas com menor grau de interconexão.

As linhas de fluxo local e regional são direcionadas pelas fraturas de forma que os poços que interceptam as anisotropias vinculadas ao fluxo regional apresentam temperaturas maiores. Por outro lado, poços que interceptem fraturas que recebam fluxo local não apresentam temperaturas acima da média. Ou ainda, poços que interceptem fraturas com fluxo regional, mas numa profundidade mais rasa também terão água de temperatura baixa.

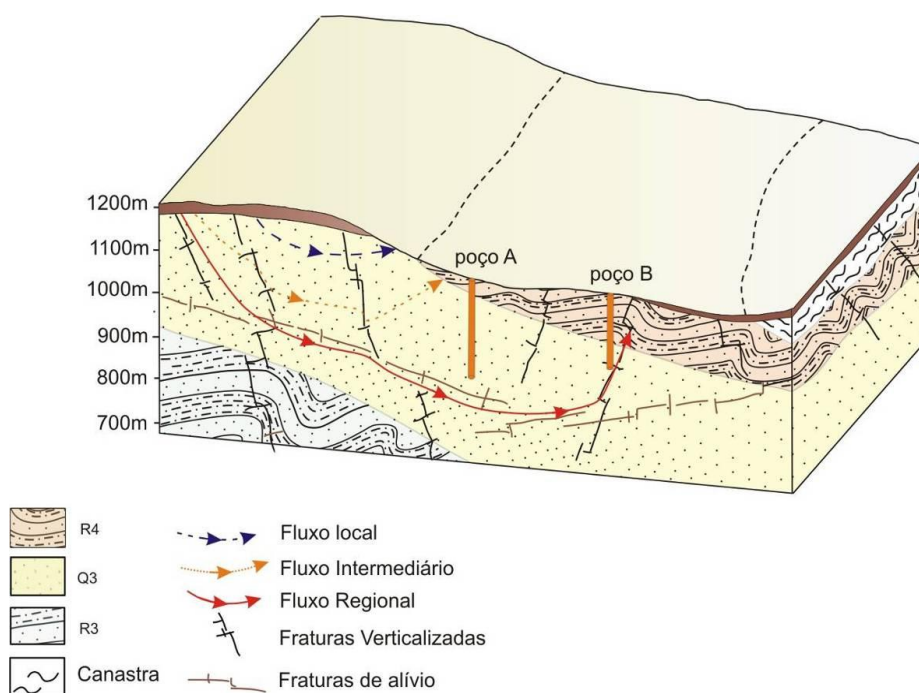


Figura 3. Representação esquemática do modelo conceitual do aquífero na região sul do Distrito Federal. O Poço A representa situação de captação seca, pois não intercepta fraturas. O Poço B representa captação de águas do sistema de fluxo regional, com elevada vazão potencial e possibilidade de se interceptar águas naturalmente aquecidas.

No modelo considerado há possibilidade de ocorrência de três diferentes sistemas de fluxo hidrogeológico na região: fluxo local, fluxo intermediário e fluxo regional.

O sistema local é observado em grande parte na migração da água subterrânea nas coberturas de solos sendo que o exutório são as nascentes de contato ou depressão existentes nas cabeceiras de drenagens e em grotas intermitentes.

O sistema regional é o responsável pelo aquecimento das águas observadas no poço

estudado. Neste caso, se considera que o fluxo descendente frio deve alcançar mais de 300 metros de profundidade. O aquecimento gerado pelo grau geotérmico deve diminuir a densidade das águas que migram para porções mais rasas através de fraturas com atitude distinta.

Para a determinação da profundidade de circulação das águas foi utilizado o geotermômetro Sílica conforme equação: $T^{\circ}C = \{1309 / (5,19 - \log SiO_2)\} - 273,15$ (proposta por Truesdell 1984) e a composição química da água (Tabela 2).

Tabela 2. Composição química média de duas análises de águas provenientes do poço em estudo. T em °C, CE em $\mu\text{S/cm}$, pH adimensional e demais substâncias em mg/l.

K	Cl	Ca	Fe	Na	SO ₄	HCO ₃	Mg	Si	STD	pH	T	CE
0,68	0,03	16,4	2,4	0,27	4,33	95,0	10,6	8,12	112,6	7,15	28,9	161,6

A aplicação do geotermômetro Sílica resulta em uma temperatura de 32,65°C e implica em uma percolação de águas a pelo menos 330 metros, uma vez que a temperatura média da água de recarga é de 21,5°C. A temperatura de 28,9°C observada na água na saída do poço é explicada pela mistura de águas de sistema de fluxo local (mais frias) com águas do fluxo regional (aquecidas pelo grau geotérmico).

O próprio confinamento do aquífero contribui para o direcionamento do fluxo para as fraturas, pois, a pressão da água subterrânea em aquíferos confinados é maior do que a pressão atmosférica, fazendo o fluxo convergir para as fraturas presentes no Subsistema **R₄**, em direção à superfície potenciométrica. O modelo de convergência de fluxo para as fraturas poderia ser comparado ao caso de um poço que intercepta a camada confinante e faz com que o fluxo convirja em direção à superfície potenciométrica. Desta forma, no modelo proposto, o sistema de fraturas e o confinamento do aquífero é que são determinantes para temperaturas da água mais elevada que a média local e regional.

Porém, mesmo com o modelo de confinamento aliado às fraturas, é mais provável que as fraturas que recebem fluxo regional sejam mais profundas que a média de ocorrência de fraturas abertas no Distrito Federal que é até 200m. Isso porque não há registro de ocorrência de poços com temperaturas anômalas no Distrito Federal apesar do elevado número de poços construídos.

Datação das Águas

Método

O decaimento radioativo do ¹⁴C com emissão de radiação gama é utilizado como método de datação em processos ambientais sendo o ciclo de meia vida de 5.568 anos (National Bureau of Standards 1961 e Leavitt 1990).

Radiocarbono é produzido naturalmente na alta atmosfera pelo bombardeamento de ¹⁴N por nêutrons secundários, gerados pela interação dos raios cósmicos e os gases

atmosféricos, sendo oxidado (14CO₂) e misturado com o CO₂ inativo (Cabral 1978). Nesta forma, ele é facilmente assimilado na biosfera e hidrosfera e incorporado no ciclo do carbono (Kalin 1999). Qualquer material que contenha o CO₂ atmosférico: organismos vivos ou água ou que tenha processos de reação com o gás deverá ter atividade de 14C igual ao composto atmosférico durante o período em que o material estiver em equilíbrio com a reserva atmosférica de carbono. Como é facilmente diluído em água, o CO₂ atmosférico está presente nas chuvas na forma de H₂CO₃, cuja reação pode ser descrita: CO₂ + H₂O <=> H₂CO₃. Na superfície, o ácido carbônico reage com o cálcio e com o magnésio da crosta, formando os carbonatos.

Determinação de idades de água subterrânea a partir de análise de ¹⁴C refere-se ao tempo decorrido desde que a água foi isolada do contato com a atmosfera, última entrada de carbono, e a data da análise da amostra. A idade do radiocarbono é determinada por comparação da atividade de ¹⁴C de uma amostra com a atividade tida como a inicial, sendo o tempo computado pela equação de decaimento radioativo (Stuiver & Polach 1977 e Fallon *et al.* 2010):

$$t = -8033 \times \ln \frac{A_{SN}}{A_{ON}}$$

Onde:

t = intervalo de tempo decorrido desde que o material foi isolado (anos) no subsolo, considerando que não houve novo aporte de carbono, até o momento da análise.

A_{SN} = atividade específica do ¹⁴C da amostra, gramas de ¹⁴C por grama do C total (pmc)

A_{ON} = atividade específica inicial do radiocarbono (padrão moderno referido ao ano 1950).

Atividade de radiocarbono pode ser usada na determinação de idades de água subterrânea, numa escala de até quarenta mil anos, contribuindo para o entendimento dos sistemas: áreas de recarga e fluxos de água (Carey *et al.* 2004 e Leavitt 1990).

A medida de radiocarbono pode ser feita por diversos métodos, dentre eles, o de contagem direta dos átomos de radiocarbono (acelerador com espectrômetro de massa). A imprecisão na determinação dos valores iniciais de radiocarbono, quando da entrada da água no subsolo, conduz a erros na estimativa da velocidade de fluxos de água subterrânea (Cabral 1978).

A imprecisão nas datações por radiocarbono está relacionada à variação da concentração de ^{14}C na atmosfera; intercâmbio e distribuição do ^{14}C entre a atmosfera e os reservatórios terrestres, e por fim, pela incerteza da frequência da desintegração radioativa. Por isso, as datações com utilização de radiocarbono, referem-se a idades relativas, devendo-se considerar uma margem de erro. De acordo com Fontugne (2005), os parâmetros que controlam o nível de ^{14}C referem-se a produção do radioisótopo na alta atmosfera, que é controlada pelo fluxo de partículas cósmicas incidentes e a intensidade do campo magnético terrestre, e por último, as trocas e a distribuição entre os diferentes reservatórios de carbono relacionados aos oceanos, a biosfera e a atmosfera. Antes de 1950, excetuando-se as alterações climáticas, as modificações impostas pelos demais processos às taxas de radiocarbono na atmosfera são tidas como pouco expressivas não excedendo os valores da “atividade moderna”. O termo “atividade moderna” refere-se à atividade de radiocarbono pós 1950, período de aumento do nível de ^{14}C atmosférico, promovido pelas explosões nucleares e intensificação do uso de combustíveis fósseis.

A coleta foi feita de forma direta utilizando frasco de vidro com tampa rosqueável. Antes da coleta da amostra o poço foi deixado em vazão espontânea com a abertura da válvula por trinta minutos. Esta ação é considerada necessária para que a água das porções profundas do aquífero fraturado substitua toda a água estagnada na coluna de revestimento. A amostra de 2,5 litros foi enviada para o Centro de Análises de Radiocarbono - SSAMS da Universidade Nacional da Austrália, onde foi realizada a análise a partir do método do acelerador com espectrômetro de massa.

Resultado

A idade de radioisótopo determinada neste estudo refere-se ao tempo decorrido entre a recarga, seu tempo de circulação no aquífero e o ponto onde a amostra foi coletada. Também há a possibilidade de que a idade represente a mistura de águas em circulação no aquífero com águas estagnadas nas porções mais profundas do aquífero.

Na possibilidade de misturas de águas de idades diferentes, águas presentes em zonas mais profundas terão menor concentração ^{14}C que as águas mais jovens, tendendo a aumentar a idade destas idades com o aumento da profundidade. Nesse caso, não é possível por esse método estabelecer a distinção entre águas de recargas diferentes, pois a idade obtida se refere à média da mistura.

Os dados da Tabela 3 mostram que a água tem idade de 4.290 anos AP (antes do presente) com um erro de 60 anos AP, isto é, a água datada pode ter idade que varia de 4.230 anos AP até 4.350 anos AP.

Nome da Amostra	$\delta^{13}\text{C}$	Erro	Percentual de Carbono moderno	Erro	Conteúdo de ^{14}C	Erro	Idade ^{14}C	Erro
AV-01	-14,6‰	±3	58,6	±0,51	-413,9	±5,1	4.290 anos AP	±60

Tabela 3. Resultado da análise do Carbono 14 para datação da água subterrânea obtida no Poço P4.

O principal indicador da não interação entre as águas e seu reservatório é a ausência de carbonatos no aquífero, uma vez que os reservatórios são representados por quartzitos, metarritmitos argilosos e filitos. Este dado indica que não deve haver contribuição significativa de Carbono oriundo da interação das águas com seu reservatório.

A avaliação do $\delta^{13}\text{C}$ mostra que a idade de 4.260 ± 60 anos AP é um dado confiável,

não sendo afetado pelo possível aporte de Carbono a partir das rochas que compõem os reservatórios.

A análise local (até 2 km de raio), semi-regional (entre 2 e 15 km de raio) e regional (maior que 15 até 40 km) indica que as áreas de recarga possíveis para a manutenção do fluxo em direção à poligonal de estudo apenas pode ser atribuída à Chapada de Brasília, situada entre 12 e 20 km a norte da região em estudo.

Esta conclusão é baseada nos seguintes argumentos:

- Esta região é a mais elevada em um raio de 40 km;
- Esta chapada apresenta relevo suave ondulado e é recoberta por solos arenosos, os quais mostram condutividade hidráulica muito alta;
- As rochas que sustentam a chapada apresentam reologia mais propícia para manter fraturas abertas a maiores profundidades.

Todas as condicionantes descritas anteriormente não se repetem em um raio de 40 km, sendo a cota topográfica um dos parâmetros mais importantes para condicionar a zona de recarga preferencial.

A seguir é apresentada uma análise inversa para a avaliação do resultado da idade da água a partir dos dados hidrodinâmicos e da área de recarga.

A velocidade linear de fluxo pode ser obtida pela equação: $v = K \cdot \text{Grad } h / I_{fi}$, onde:

- ✓ v - velocidade linear média de fluxo;
- ✓ K - condutividade hidráulica média (em aquífero anisotrópico);
- ✓ $\text{Grad } h$ - gradiente hidráulico;
- ✓ I_{fi} - Índice de fraturas interconectadas (equivalente à porosidade efetiva).

Para aplicação da equação foram considerados os seguintes parâmetros:

- ✓ K da ordem de grande de 10^{-7} m/s, valor relativo a média do Subsistema **R₃/Q₃**;
- ✓ $\text{Grad } h$ de 0,011, equivalente a um desnível de 220 m em 20 km de linha de fluxo;
- ✓ I_{fi} de 2%, valor coerente com o sistema fraturado em estudo.

A velocidade calculada do fluxo é de $5,5 \times 10^{-7}$ m/s ou de 17,35 m/ano.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A análise conjunta de todos os dados permite enumerar as seguintes conclusões:

Na área estudada, a água subterrânea ocorre em mais de um tipo de meio, incluindo aquíferos do tipo intergranular (associado aos solos) e aquíferos fraturados, em unidades rochosas dos grupos Paranoá e Canastra. O principal aquífero da região, o Subsistema **R₃/Q₃** é caracterizado como fraturado-artesiano em que as rochas argilosas da Unidade **R₄** funcionam como camada confinante. O

Considerando a possibilidade simplificada da presença de fluxo laminar no sistema aquífero anisotrópico a partir de uma relação linear, fica claro que as águas infiltradas nas porções mais distais da Chapada de Brasília necessitariam de 1.152 anos para migrar desde a zona de recarga até a região de exploração na área.

Assim, a água deveria ter no máximo 1.150 anos e não 4.260 anos como mostrado pela análise do Carbono 14. Como a avaliação do dado de datação pelo radiocarbono mostra que se trata de uma informação confiável e coerente com os dados, é necessário propor uma análise de cenário para melhor entendimento da idade obtida.

A explicação mais realista para a idade obtida é a presença de fluxo estagnado em porções mais profundas do aquífero, isto é, condição sem fluxo em que parte da água fica retida em fraturas profundas. Neste caso as águas de cerca de 1.150 anos AP se misturam em diferentes proporções com águas mais antigas de forma a se alcançar idades maiores que 4.000 anos AP.

As águas mais antigas devem compor parte da reserva permanente contidas em fraturas muito profundas que estão naturalmente abaixo do nível de base dos exutórios e, portanto, não podem migrar em direção a área de descarga. Tais águas apenas podem entrar no sistema de fluxo se a porção do aquífero em que estão contidas for submetida a bombeamento. Neste caso, o rebaixamento da superfície potenciométrica resultará na criação de um gradiente hidráulico que forçará o fluxo de uma região de maior carga hidráulica para outra de menor carga hidráulica.

Subsistema **R₃/Q₃** também ocorre como aquífero livre nas áreas de afloramento das formações Serra da Meia Noite e Ribeirão Contagem. O domínio intergranular é representado pelos sistemas **P₁** e **P₄**.

A presença de fraturas abertas a profundidades maiores que 300 metros e o sistema de fluxo regional são considerados os principais controles do aquecimento da água. No modelo proposto os poços interceptam fraturas ligadas ao sistema de fluxo regional.

Este é o único caso descrito de água com temperatura anômala no Distrito Federal. Existem outros casos de áreas com geologia e geomorfologia similares, mas não há fraturas abertas a maiores profundidades e sistema de fluxo regional capazes de resultar no aumento da temperatura da água.

O uso para fins balneários das águas quentes nessa região poderá ocasionar a construção de novos poços. Para que não haja sobreexploração e contaminação dos reservatórios de água subterrânea recomenda-se seguir procedimentos técnicos para a construção de novos poços, como manter a distância mínima de 500 m entre os poços, isolamento da parte mais rasa do poço, uso de filtros para otimizar a capacidade do poço, medidas de vazões dos poços na construção e em sua manutenção.

A idade das águas obtida pelo método do radiocarbono ^{14}C resulta em 4.260 ± 60 anos AP. Este valor se mostrou incoerente com o modelo de fluxo proposto para o sistema aquífero em estudo. Desta forma, esta idade é explicada pela mistura de águas armazenadas e estagnadas em fraturas profundas (que compõem parte das reservas permanentes) com águas mais jovens relacionadas a fluxo local e intermediário.

As águas com maior temperatura não devem ser utilizadas para o abastecimento público, devendo ser aplicadas apenas para os fins de balneário (uso em piscinas aquecidas). Para o abastecimento público os aquíferos mais rasos com águas com temperaturas inferiores a 23°C devem ser priorizadas.

O tempo de bombeamento diário de 16 horas é compatível com o sistema aquífero fraturado em exploração, sendo que as demais 8 horas diárias são importantes para a recuperação dos níveis e para a limitação dos cones de depressão na região.

A viabilização das captações está vinculada a construção e operação de uma bateria de poços e às práticas de recarga artificial. Após início de operação dos poços, os níveis estáticos deverão ser monitorados continuamente sendo fundamental a instalação de hidrômetros e piezômetros desde as fases de construção dos poços.

Em função da grande vazão do poço (maior que $250 \text{ m}^3/\text{h}$) é muito provável que a construção de novos poços com maior profundidade resulte no aumento da temperatura das águas. Estima-se que, caso existam entradas de água entre 300 e 350 metros de profundidade, a temperatura da água possa ser incrementada entre 4 e 6°C .

REFERÊNCIAS

1. AMORE, L. 1994. Fundamentos para uso e proteção das águas subterrâneas do Distrito Federal. Escola de Engenharia de São Carlos, Dissertação de Mestrado.
2. BAPTISTA, G.M.M. 1998. Caracterização Climatológica do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/SEMATEC/UnB. Parte VI. p.187-208.
3. BARROS, J.G.C. 1992. Características geológicas e hidrogeológicas do Distrito Federal. In: Cerrado, caracterização, ocupação e perspectivas - O caso do Distrito Federal. UnB/SEMATEC, 657p.
4. CABRAL, F.C.F. 1978. O uso de isótopos de carbono no estudo das águas subterrâneas do calcário Bambuí - região central da Bahia. Dissertação (Mestre em Ciências). Câmara de Pesquisa e Ensino em Pós-Graduação. Universidade Federal da Bahia, 83 p.
5. CADAMURO, A.L.M. 2002. Proposta, Avaliação e Aplicabilidade de Técnicas de Recarga Artificial em Aquíferos Fraturados para Condomínios Residenciais do Distrito Federal. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Dissertação de Mestrado, 130p.
6. CAMPOS, J.E.G., TROGER, U., HAESBAERT, F.F. 2005. Águas Quentes de Caldas Novas, Goiás - Notável ocorrência de águas termais sem associação com magmatismo. Sítios Geológicos Paleontológicos do Brasil. <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio113/sitio113.pdf>.
7. CAMPOS, J.E.G. & FREITAS-SILVA, F.H. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Parte I. Vol II. IEMA-SEMATEC/Universidade de Brasília. (Inédito). 66p.
8. CAMPOS, J.E.G. & FREITAS-SILVA, F.H. 1999. Arcabouço hidrogeológico do Distrito Federal. In: XII Simp. Geol. Centro-Oeste. Boletim de Resumos. Brasília. 113p.
9. CAMPOS, J.E.G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. RBG(1), 41-48.
10. CAREY, A.E.; DOWLING, C.B.; POREDA, R.J. 2004. Alabama Gulf Coast groundwaters: 4He and ^{14}C as groundwater-dating tools. *Geology*; 32(4):289-292.
11. CRUZ, W.B. & PEIXOTO, C.A.M. 1991. A Evolução química das águas subterrâneas de Poços de Calda, MG. *Revista Brasileira de Geociências* 21(1):23-33.
12. FALLON, S.J.; FIFIELD L.K.; CHAPPELL, J.M. 2010. The next chapter in radiocarbon dating at the Australian National University: Status report on the single stage AMS,4 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 268 898-901.
13. FONTUGNE, M. 2005. Os últimos avanços na calibragem das idades radiocarbono permitem uma revisão das cronologias entre 25 e 50.000 anos BP ?. 1º Encontro de Física e Arqueologia na Região do Parque Nacional Serra da Capivara: Descobertas e Datações. FUMDHAM - Fundação Museu do Homem Americano - Piauí - Brasil. P. 70-78
14. 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.

15. FREITAS-SILVA, F.H. & CAMPOS, J.E.G. 1998. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB 1998. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/SEMATEC/UnB. Vol. 1, Parte I. 86p.
16. HUBBERT, M.K. 1940. The theory of groundwater motion. *Journal of Geology* 48(8):785-844.
17. JOKO, C.T. 2002. Hidrogeologia da cidade de São Sebastião-DF. Implicações para a gestão do sistema de abastecimento de água. Brasília: Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Dissertação de Mestrado, 159 p., anexos.
18. LEAVITT, S. W. 1990. Isotopes and trace elements in tree rings. *Proceedings of the International Dendrochronological Symposium*, Ystad, South Sweden, 3-9.
19. LOUSADA, E.O. 2005. Estudos hidrogeológicos e isotópicos no Distrito Federal: Modelos conceituais de fluxo. Brasília-DF. 124p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
20. MARTINS, E.S. & BAPTISTA, G.M.M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In IEMA/SEMATEC/UnB 1998. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/SEMATEC/UnB. Vol. 1, Parte II. 53p.
21. MENDONÇA, A.F. 1993. Caracterização da erosão subterrânea nos aquíferos porosos do Distrito Federal. Anexo 3a: Reservas de água de superfície do Parque Nacional de Brasília. Brasília. Universidade de Brasília/Instituto de Geociências. 154p. (Dissertação de Mestrado - inédita)
22. MORAES, L.L. 2004. Estudo do rebaixamento de lagoas cársticas no Distrito Federal e entorno: a interação hidráulica entre águas subterrâneas e superficiais. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 128p.
23. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. 1961. Measurement of absorbed neutrons and of mixtures of neutrons and gamma rays, handbook 75.
24. NOVAES PINTO, M. 1994. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (org). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. Brasília. Editora UnB. 2ª ed., p. 285-320.
25. ROMANO, O. & ROSAS, J.G.C. 1970. Água subterrânea para fins de abastecimento de água e irrigação no Distrito Federal. In: Congresso Brasileiro de Geociências, 24. 1970. Anais..., Brasília, SBG, 313-333.
26. SOUZA, M.T. 2001. Fundamentos para Gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal. Brasília. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 94p.
27. STUIVER, M. & POLACH, H.A. 1977. Discussion reporting of ¹⁴C data. *Radiocarbon* 19(3):355-363.
28. TRUESDELL, A.H. 1984. Chemical geothermometers for geothermal exploration. IN: R.W. Henley; A.H. Truesdell; P.B. Barton Jr.; J.A.C. Whitney (eds.). *Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems*. *Rev. Econ. Geol.* 1:31-43.
29. ZOBY, J.L.G. 1999. Hidrogeologia de Brasília - Bacia do Ribeirão Sobradinho. São Paulo. Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências. (Dissertação de Mestrado - inédita). 178p.

*Manuscrito recebido em: 08 de Maio de 2014
Revisado e Aceito em: 07 Maio de 2015*