

POR

Adelbani Braz da Silva\*

Resumo -- O trabalho procura estabelecer uma concepção regional do comportamento hidráulico das águas subterrâneas a partir do entendimento do modelo geológico e estrutural e da evolução cárstica do aquífero situado na porção setentrional do Estado de Minas Gerais. As deformações tectônicas da "cobertura brasileira", provocadas pelos cinturões orogenéticos de Araçuaí e Brasília, construíram o arcabouço estrutural que condicionou a instalação e evolução do carste da região. Assim, os fluxos subterrâneos são congruentes com os superficiais, salvo algumas deflexões locais. Desta maneira, ocorrem "bacias" e "sub-bacias" de drenagens subterrâneas resultantes das tramas locais e regionais das fraturas das rochas. Em vista destas características ressalta-se a importância da definição das zonas de recarga e da delimitação das bacias de drenagem subterrânea durante as prospecções hidrogeológicas na região.

### INTRODUÇÃO

A água subterrânea da região cárstica que está inserida no "polígono das secas", e situada na porção setentrional do Estado de Minas Gerais, vem sendo explorada há mais de três décadas através de poços tubulares que foram localizados de maneira aleatória e sem critérios técnicos. A partir de 1977, no entanto, a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC vem realizando estudos e pesquisas, naquela parte do Estado, visando definir as características hidrogeológicas do aquífero para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos.

Recentemente, alguns poços tubulares foram perfurados naquela região, após acurados estudos hidrogeológicos que tiveram o objetivo de escolher os locais mais promissores. Estes poços apresentaram vazões de 70 m<sup>3</sup>/h a mais de 300 m<sup>3</sup>/h, enquanto a média anterior dos poços existentes era da ordem de 10 m<sup>3</sup>/h.

Neste contexto o presente trabalho procura estabelecer uma concepção regional do comportamento hidráulico das águas subterrâneas a partir do entendimento do modelo geológico e estrutural e da evolução cárstica do aquífero.

---

\* Professor de Hidrogeologia da UFMG e geólogo da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC.

Trata-se de um trabalho que sintetiza as observações de campo do autor, pesquisas bibliográficas e interpretações regionais feitas em imagens de radar e do satélite Landsat.

O objetivo principal deste trabalho, em última análise, é o de fornecer subsídios a pesquisa hidrogeológica dos aquíferos cársticos de Minas Gerais, os quais deverão ser utilizados na perspectiva de serem aprimorados e aplicados na área em apreço e em outras regiões cársticas do Brasil

### ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

A água subterrânea regional ocorre em aquíferos granulares dos arenitos cretácicos e depósitos arenosos quaternários e em aquíferos cársticos. Neste trabalho serão enfocados apenas estes últimos, em vista das suas características peculiares quanto a ocorrência de água subterrânea, e sua importância econômica, tanto para abastecimento urbano como para irrigação.

O aquífero cárstico da região é livre, heterogêneo, anisotrópico e de espessura variável. Os sistemas hidráulicos subterrâneos destes aquíferos apresentam características próprias em decorrência da origem e evolução secundária dos vazios nas rochas carbonáticas por onde circulam as águas. Estes vazios estão relacionados ao fraturamento, diáclases, dissolução das rochas, tipo litológico, acamamento estratigráfico, zonas de infiltração e outros, e são eles que propiciam a infiltração, circulação, armazenamento e descarga da água subterrânea.

A variação espacial das características hidrogeológicas e do comportamento da água subterrânea desses aquíferos cársticos é grande e está influenciada por fatores regionais do modelamento estrutural das rochas e dos processos de carstificação e, também, por fatores locais, tais como, intensidade de dissolução, densidade de fraturamento, preenchimento de fraturas, reabastecimento do aquífero e outros. Na maioria dos casos, os fatores locais são condicionados aos regionais, principalmente aqueles que provocaram o fraturamento das rochas e aos processos de carstificação. Dentro deste contexto, em continuação, apresentam-se os aspectos mais significativos do desenvolvimento geológico-estrutural regional, como também, da evolução cárstica e suas relações com a ocorrência e a circulação das águas subterrâneas, na tentativa de estabelecer as linhas gerais de um modelo físico-hidrogeológico do aquífero de modo a facilitar a prospecção e exploração das águas subterrâneas.

### MODELAMENTO GEOLÓGICO ESTRUTURAL

Conforme mostra a figura 1 as rochas pelítico-carbonáticas do Grupo Bambuí são recobertas por rochas sedimentares detriticas do cretáceo e do quaternário e são bordejadas por rochas que constituem faixas de dobramentos geológicos desenvolvidos durante o "ciclo geotectônico Brasileiro", em decorrência de processos pós-geossinclinais no Ordoviciano. A seqüência de rochas do Grupo Bam

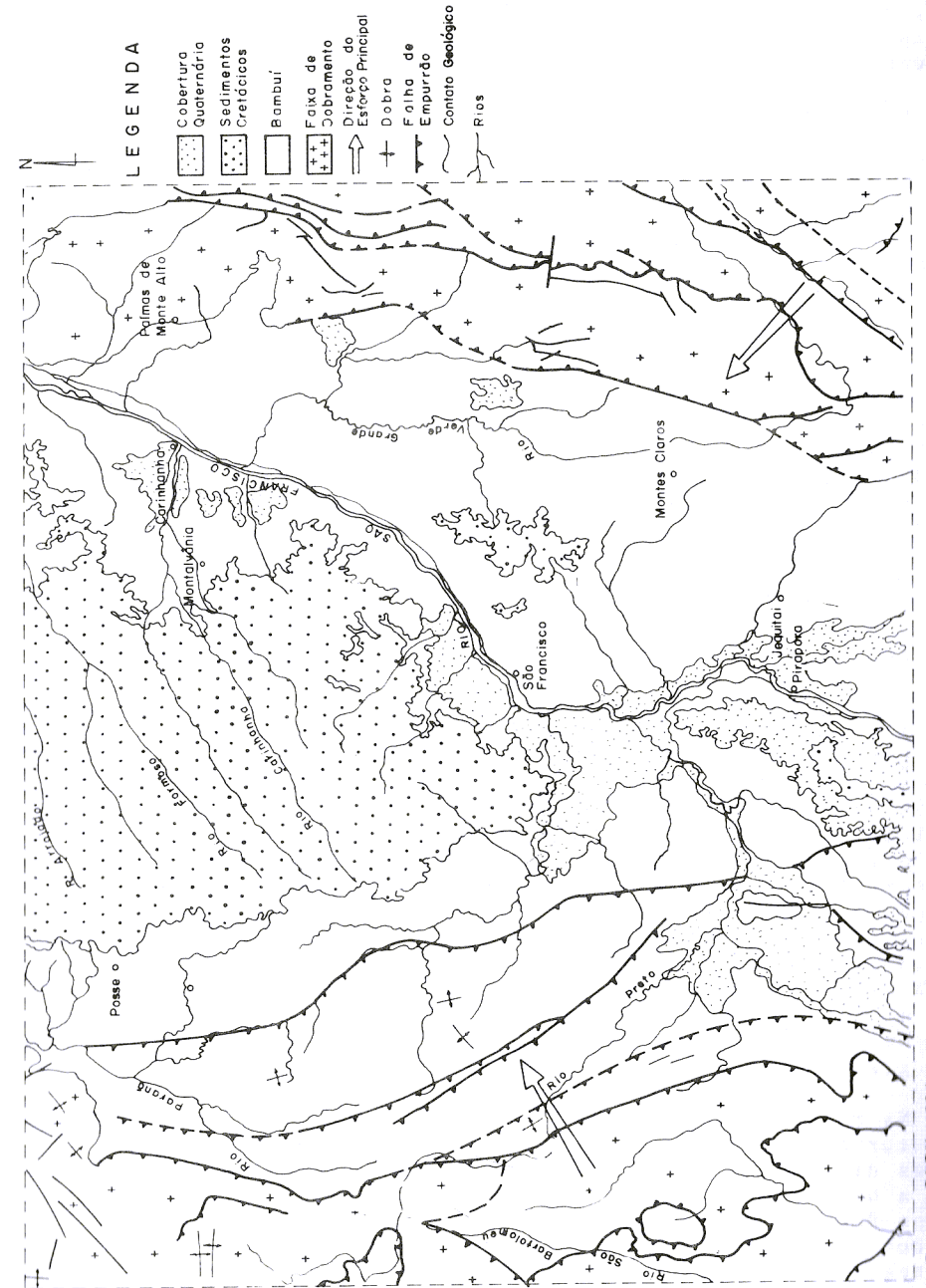


FIGURA 1 - GEOLOGIA DA REGIÃO



buí, por outro lado, foi depositada sobre rochas granítica-gnáissicas do "craton do São Francisco" que é uma plataforma rígica cujo embasamento teria consolidado-se em tempos pré-brasilianos.

O Grupo Bambuí, depositado sobre o "craton do São Francisco", representa a sedimentação marinha resultante de sua submersão quase total, por ocasião do desenvolvimento do segundo estágio estrutural nos geossinclinaes marginaes, ALMEIDA (1977). A sedimentação predominantemente pelítica e carbonatada do Grupo Bambuí sobre a área cratônica indica, por outro lado, ambiente de águas marinhas rasas e planícies de maré, em área subsidente geralmente de baixa a média energia, MARCHESI (1974). Desta maneira, o Grupo Bambuí forma a "cobertura" do craton, chamada na literatura geológica de "cobertura brasileira".

Segundo ALMEIDA (1977) as deformações geo-estruturais que se observam na cobertura brasileira sobre o craton são reflexos da tectogênese das faixas marginaes de dobramento. As rochas do Grupo Bambuí, na região em questão, foram submetidas a esforços tectônicos oriundos das faixas de dobramentos Araçuaí, a leste, e Brasília, a oeste, conforme mostra a figura 2. Estas faixas apresentam dobramentos lineares holomórficos e grandes falhamentos inversos, num conjunto estrutural que manifesta acentuadas vergências em direção ao craton. Tais vergências resultaram num transporte tectônico em direção a região em apreço, através de esforços de compressão sobre as rochas da cobertura do craton, como pode-se observar no croquis da figura 3.

A faixa Araçuaí provocou esforços que agiram segundo uma direção geral variando de aproximadamente N50 a 60W e a faixa Brasília segundo N30 a 40E. Estes esforços provocaram deformações e rupturas na cobertura originando dobramentos, principalmente nos pelitos, das partes próximas as bordas do craton. Isto é observado, por exemplo, a leste de Francisco Sá, onde a seqüência pelítico-carbonatada mostra várias dobras com eixos de direção N30E e vergência N60W. Em direção ao interior da bacia Bambuí, todavia, as camadas tornam-se pouco perturbadas dispondo-se de forma sub-horizontal em vastas extensões. Assim, o craton comportou-se como "substrato indeformável" a estes esforços marginaes evitando grandes movimentações tectônicas do Grupo Bambuí, conseqüentemente, tem-se um modelo de deformação simples onde não devem ser esperados grandes falhamentos transcorrentes.

Na região de Januária, diques de rochas básicas e ultrabásicas cortam o bloco alto do embasamento que ocorre naquela área. Estes diques são encaixados em fraturas regionais com direções de N50 a 60W graus, PAULSEN et alii (1974), que coincidem com as do Grupo Bambuí. No momento não é possível relacionar estes fraturamentos com aqueles provocados pelas faixas de dobramentos. Além destes diques, verifica-se, ainda, falhas de gravidade, que atingiram as rochas do Grupo Bambuí, cujas direções divergem daquelas provocadas pelas vergências dos cinturões orogenéticos. É provável que estes falhamentos estejam relacionados a fenômenos para-tectônicos posteriores ao tecto-magmatismo brasileiro ou a reativação de falhas do embasamento.

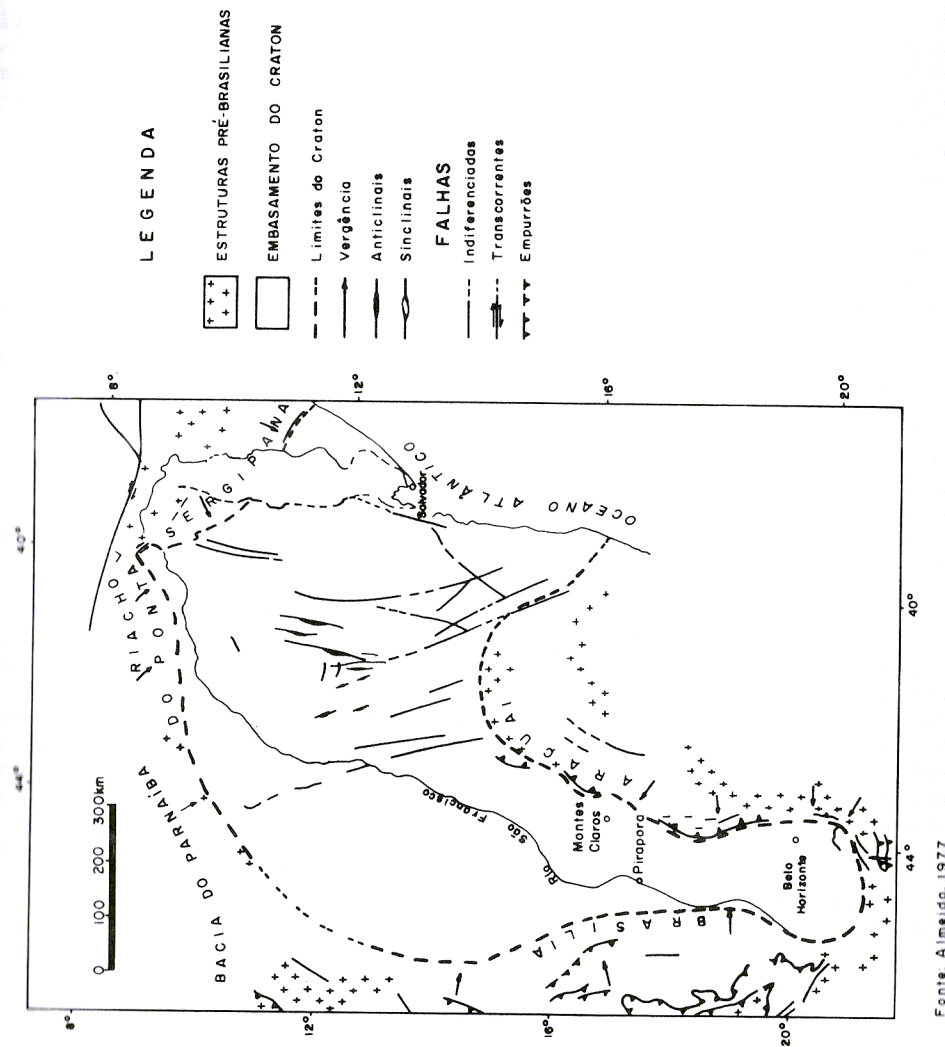


FIGURA 2 - ESBOÇO DO CRATON DO SÃO FRANCISCO

Fonte: Almeida, 1977

Do exposto, e com as observações de campo, verifica-se a existência de duas direções principais de esforços de deformação na região, ou sejam: N60W e N30E. O modelo de deformação teórico seria semelhante ao mostrado nas figuras 4 e 5, onde o maior esforço ( $\sigma_1$ ) seria oriundo da vergência da tectogênese e o menor ( $\sigma_3$ ) seria o esforço horizontal. Não existiram condições de cisalhamentos marcantes conforme explicado anteriormente.

Como o calcáreo é uma rocha rúptil os esforços de compressão das vergências provocaram às rupturas de distensão, mais abertas, e secundariamente fraturas longitudinais aos esforços e poucas de cisalhamento. Como os esforços das duas vergências tectônicas (Brasília e Araçuaí) são perpendiculares entre si, tanto as fraturas de distensão como as de compressão, são abertas e importantes para a hidrogeologia.

Nas porções mais orientais da região predominam as direções N60W da faixa de dobramentos Araçuaí e nas ocidentais as N30E da faixa Brasília. Com o alívio do peso da rocha ( $\sigma_3$ ), em consequência de erosões posteriores, estas fraturas tornaram-se mais abertas. Pode-se concluir que os sistemas de fraturas e falhas implantados na região são de tempo geológico muito antigo correspondendo ao pré-cambriano superior.

O resultado das deformações geo-estruturais do Grupo Bambuí foi uma trama de fraturas e falhas de dimensões regionais e, na maioria das vezes, de âmbito local, que constitui o arcabouço estrutural da região. Assim, deve-se procurar identificar estas interrelações locais e regionais para se estabelecer as zonas principais de ocorrência de água subterrânea. Este quebramento diferenciado das rochas na região se deu em virtude de vários fatores, dos quais destacam-se, plasticidade das rochas, estratificação, espessura das camadas e outros, além da distância às bordas do craton. Assim, o comprimento das fraturas e a predominância de algumas direções de fraturamento em certas áreas da região refletem, localmente, a reação das rochas à ação dos esforços tectônicos.

#### EVOLUÇÃO CÂRSTICA

As linhas gerais do relevo atual conformaram-se através do "ciclo erosivo Velhas", KING (1956), e por processos de erosão-se dimentação do tipo pedimentar. As superfícies de aplainamentos e os depósitos correlativos destas superfícies, que ocorrem na região, são considerados por PENTEADO e RANZAM (1973) como pleistocênica. Além disso, houve outra etapa de evolução do relevo de idade quaternária que foi responsável pelos últimos encaixamentos fluviais e pelo retrabalhamento da superfície pleistocênica.

Verifica-se do exposto, que o relevo atual e o carste são recentes e foram instalados sobre uma configuração geo-estrutural pré-existente que condicionam a drenagem e a circulação de água subterrânea, tendo como nível de base regional o rio São Francisco. Não há indícios de reativação tectônica recente na região. Tudo isto indica que o reconhecimento do funcionamento hidráulico do carste passa primeiro pelo estabelecimento do modelo geo-estru

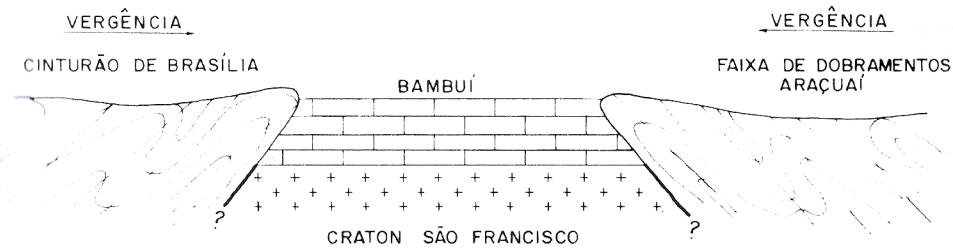


FIGURA 3 - ESQUEMA DE DEFORMAÇÃO DA COBERTURA BRASILEIANA

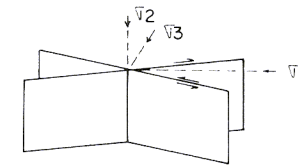


FIGURA 4 - DISPOSIÇÃO DOS ESFORÇOS QUE PROVOCARAM AS RUPTURAS DAS ROCHAS

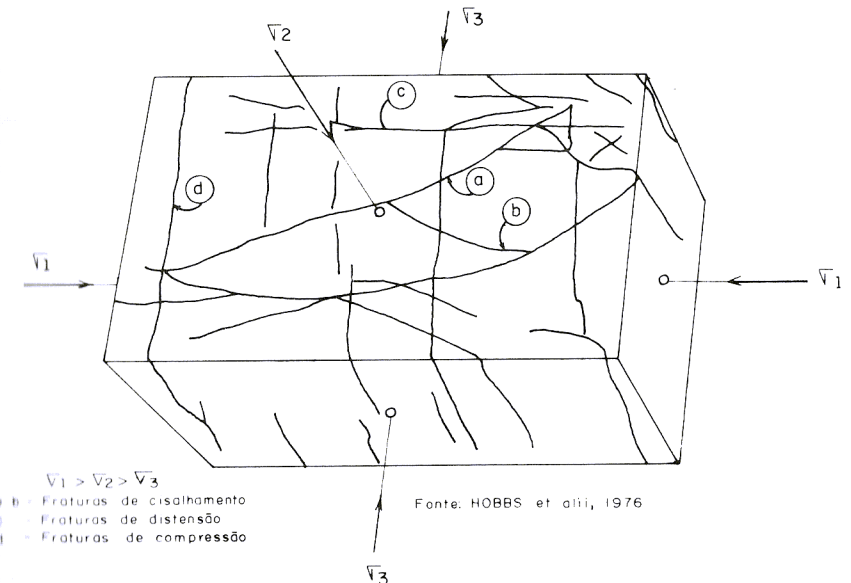


FIGURA 5 - BLOCO DIAGRAMA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO AS FRATURAS ORIGINADAS NA TECTOGÊNESE



tural da região, isto é, existiam as fraturas e só depois é que a dissolução das rochas carbonáticas se processou.

As condições de dissolução da rocha são afetadas por fatores, principalmente geológicos, que conferem uma maior ou menor permeabilidade ao aquífero e influenciam nos processos de carstificação. Destes fatores, as fissuras desempenham o papel mais importante tanto nos processos de carstificação como nos de recarga, circulação e descarga. As falhas e grandes fraturas se transformam nos canais principais de circulação, ampliados naturalmente através da dissolução, inclusive, em casos especiais, podendo atingir grandes profundidades. Normalmente, as falhas e fraturas em regiões cársticas, são refletidas na morfologia da superfície do terreno através de feições típicas do carste, como o alinhamento de dolinas, vales cegos e outros.

A água vai esculpindo as feições características do carste através de sua circulação nas estruturas primárias criadas pela tectogênese, gerando condutos controlados pelas descontinuidades das rochas. Estes condutos nas proximidades da superfície são verticais ou inclinados, tendendo a horizontalização, à medida que se aprofundam ou atingem a zona de saturação. As zonas de dissolução, por sua vez, podem existir a grandes profundidades, no entanto, o mais comum é a diminuição ou a tendência a se fecharem a medida que se avança em profundidade. O fator determinante desta profundidade é, principalmente, o nível de base do aquífero ou, em caso excepcional, grandes falhas geológicas regionais.

Como foi visto as fraturas, falhas ou outras rupturas da rocha desempenham papel importante, dentre os fatores geológicos, no desenvolvimento do carste e no seu comportamento hidrogeológico. Assim, quanto maior for a densidade de descontinuidades geológicas, maior será a ação da água sobre a rocha. As grandes fraturas e falhas serão os condutos principais onde se instalarão os canais de dissolução principais e a trama secundária constituirá drenos auxiliares de circulação de água subterrânea.

Convém salientar que os processos de erosão e decomposição das margas, siltitos e calcários argilosos dão como produto final argilas detríticas que formam os solos ou penetram nos canais de dissolução e fissuras das rochas durante a infiltração ou recarga do aquífero. Esta contínua infiltração de argila e água pode acarretar a colmatação das fissuras, ou até dos canais de dissolução, e conseqüentemente diminuir a produtividade do aquífero através de impermeabilização da trama das geo-estruturas.

É comum, ainda, em algumas áreas do Grupo Bambuí, a ocorrência de veios de quartzo preenchendo as fraturas das rochas. Esta injeção de soluções ácidas se processou pós-geneticamente preenchendo as suturas pré-existentes nas rochas. Este fenômeno prejudica a infiltração e circulação da água subterrânea nestas partes dos aquíferos, diminuindo assim a sua permeabilidade secundária.

Em vista do modelo geo-estrutural e da evolução cárstica do aquífero descritos anteriormente, pode-se concluir que, as direções dos fluxos das drenagens subterrâneas do aquífero são con-

gruentes com as das drenagens superficiais intermitentes ou mesmo as perenes, salvo raras exceções locais. O nível de base regional destas drenagens é o rio São Francisco.

### EXPLOTAÇÃO DO AQUÍFERO

As discussões anteriores serviram para ressaltar os aspectos fundamentais das condições hidrogeológicas da região, delinear as potencialidades dos seus recursos hídricos e orientar a prospecção e exploração das águas subterrâneas.

É evidente que em escala local serão encontradas zonas com diferentes características do ponto de vista tectônico e de carstificação. Assim, nos trabalhos de localização de zonas favoráveis a captação de águas subterrâneas na região não deverão ser abandonados os critérios clássicos da literatura referentes as associações entre fraturas e formas cársticas e outros, SILVA (1984).

A carstificação, como era de se esperar, agiu diferentemente em vários pontos da área. Isto resultou um aquífero cárstico com zonas de diferentes potencialidades hidrogeológicas. As zonas com maiores densidades de dolinas refletem uma maior carstificação e, normalmente, encontram-se em áreas de recarga do aquífero. Em determinadas partes da região os esforços tectônicos provocaram maiores deformações. Nestas partes são encontradas grandes densidades de fraturamentos e as fraturas são dispostas em várias direções secundárias, principalmente em áreas de ocorrência de calcários mais puros, sem argilas. As zonas pelíticas do Grupo Bambuí, por sua vez, tendem a originar dobras e possuir menor carstificação. Além disso, as fraturas nestas zonas, normalmente, são preenchidas por argilas detríticas.

Estatisticamente as fraturas que mais ocorrem na região são as com azimutes de 30 a 40, 110 a 120, 10 a 20 e 130 a 140 graus. As fraturas com azimutes de 130 a 140 graus são, predominantemente, grandes fraturas, SILVA (1984). Desta maneira, e conforme o modelo geo-estrutural proposto, as fraturas com azimutes de 30 a 40 e 130 a 140 graus são as mais abertas e ao longo delas devem estar instaladas as principais zonas de dissolução e circulação das águas subterrâneas.

Outra característica importante é a ocorrência de "bacias" e "sub-bacias" de drenagens subterrâneas decorrentes da gênese do carste. Este fato é importante porque em algumas partes do aquífero, onde a sub-bacia é pequena, a variação sazonal dos níveis do aquífero entre as épocas úmidas e secas pode ser grande (no morro Catarino, no município de Manga, chega a 32 metros) e diminuir sensivelmente a produtividade dos poços tubulares. Assim, na localização de pontos de captação de água subterrânea deve-se definir a área de drenagem a montante do local escolhido para quantificar as disponibilidades hídricas e garantir as vazões dos poços durante a exploração.

Os arenitos sobrepostos a seqüência pelítico-carbonatada do Grupo Bambuí estão em conexão hidráulica com o carste e servem co-



mo fonte de reabastecimento do aquífero.

Na figura 6 encontra-se o mapa de parte da área em apreço confeccionado a partir da interpretação de uma imagem do satélite Landsat. Observa-se também nesta figura alguns pontos onde existem poços com vazões excepcionais, compreendidas entre 70 m<sup>3</sup>/h a mais de 300 m<sup>3</sup>/h.

### CONCLUSÕES

Do exposto pode-se ressaltar as seguintes conclusões:

- O modelo geo-estrutural regional sugere que a prospecção de água subterrânea seja prioritariamente realizado ao longo das fraturas de distensão originadas das deformações tectônicas provocadas pelos cinturões orogênicos do "craton do São Francisco". Estas fraturas são as com direções N 50 a 60 W e N 30 a 40 E.

- Nos trabalhos de prospecção hidrogeológica em detalhe e de localização de pontos de captação de água subterrânea na região, não devem ser relegados aqueles critérios clássicos encontrados na literatura geológica dos carstes, quando a litologia, relações morfoestruturais, densidade de fraturas e de dolinas, e outros.

- O preenchimento das fissuras e canais de dissolução, em certas partes do aquífero, ocorreu através de argilas detríticas provenientes da decomposição das rochas do Grupo Bambuí ou por meio de veios de quartzo que cortaram as rochas.

- Os fluxos das águas subterrâneas são congruentes com aqueles das drenagens superficiais.

### BIBLIOGRAFIA

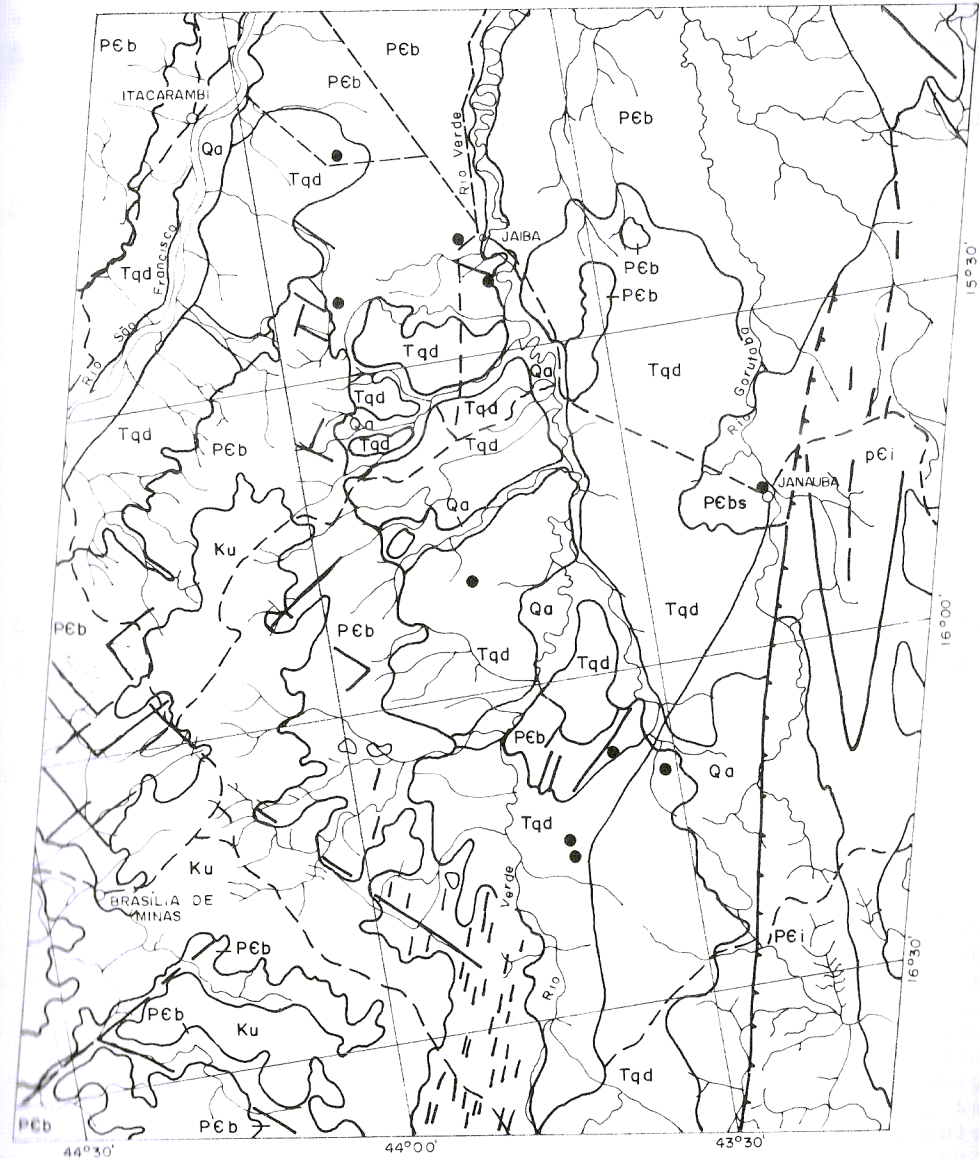
ALMEIDA, F.F.M. - 1977 - O craton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências, 7(4):349-364.

DNPM-Departamento Nacional da Produção Mineral - 1984 - Geologia do Brasil. Texto Explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. 501 pp. Brasília.

KING, L.C. - 1956 - A geomorfologia do Brasil Oriental. Revista Brasileira de Geografia, ano 28, 18(2):53-70.

MARCHESE, H.G. - 1974 - Litoestratigrafia y petrologia del Grupo Bambuí en los estados de Minas Gerais e Goiás, Brazil. Rev. Bras. Geoc., 4:172-190.

PAULSEN, S; PAULINO, J; BOSSUM, W & LIMA, J.E.S. - 1974 - Ocorrência de rochas cristalinas no norte de Minas Gerais. In: XXVIII Cong. Bras. Geol., Porto Alegre. Anais da SBG, 4:183-188.



### LEGENDA:

- |                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Qa-Aluviões                       | — Fraturas ou Falhas        |
| Tqd-Coberturas Detríticas         | — Falha de Empurrão         |
| Ku-Arenitos Cretáceos             | — Contato Geológico         |
| P&Cb-Grupo Bambuí                 | ● Poço de Vazão Excepcional |
| P&Ci-Pré-Cambriano Indiferenciado | ○ Cidade                    |

FIGURA 6 - ESTRUTURAS OBSERVADAS EM IMAGENS DE SATÉLITE

PENTEADO, M.M. & RANZANI, G. - 1973 - Relatório de viagem ao vale do rio São Francisco, Geomorfologia. USP, Instituto de Geografia, Publicação 40, São Paulo.

SILVA, A.B. - 1984 - Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais. São Paulo, 190 pp. (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo), circulação restrita.

CONTRIBUIÇÃO DA GEOLOGIA ESTRUTURAL NA EXPLOTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO GRUPO BAMBUI NA REGIÃO NORTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS

POR

Adelbani Braz da Silva

Abstract -- From the geologic situation of an aquifer on the north of Minas Gerais was tried to draw the region groundwater behaviour. The tectonics strains of the "brazilian cover" due to the orogenic belt of Araçuaí and Brasília build up a structure characteristics which result in the local karst configuration. Groundwater flows is equal to superficial ones, resulting in groundwater drainage "basin" and "sub-basin" due to local and region rock fractures. Thus became clear that is essential to find the recharge zone and the groundwater drainage "basin" during hydrogeologic prospections.