

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA JAZIDA DE ITATAIA-CE

José Roberto de Alcântara E Silva¹

Resumo - O presente trabalho analisa o comportamento hidrogeológico, geotécnico e geofísico de um aquífero cárstico-fissural, na área denominada jazida fósforo-uranífera de Itataia, localizada na região centro-norte do Estado do Ceará. A área é constituída por mármore e gnaisses do Grupo Itataia, morfologicamente situados em uma porção mais elevada, a sul, e outra de baixada, a norte, com idade atribuída ao Paleoproterozóico. O sistema de fraturas propiciou a instalação de duas fases cársticas nos mármore, sendo a mais antiga de idade provavelmente do Cambriano e a mais recente do Terciário/Quaternário. A porosidade é secundária, condicionada pelas fraturas, fissuras e zonas fragmentadas, que funcionam como condutores hidráulicos para o fluxo da água subterrânea. Os principais eixos condutores, definidos pela geofísica, são controlados por fraturamentos e falhamentos normais, cujas características dos falhamentos são típicas do modelo *graben* e *horst*. O que caracteriza o fluxo da água subterrânea são as fraturas alargadas pela dissolução do fenômeno cárstico, que vão se tornando mais fechadas à medida que se aprofundam. A profundidade do nível d'água situa-se entre um mínimo de 5 metros e um máximo de 90 metros, com um valor médio da ordem de 30 metros para toda a área.

Abstract - This work analyzes the hydrogeological-geotechnical-geophysical behavior, aiming to define the characteristics of a karstic-fissural aquifer in the mid-northern region of the State of Ceará, named as Itataia Phosphor-Uranium Deposit. This area is constituted of marbles and gneisses from Itataia Group, which are morphologically located at a higher point to the south and at a lower point to the north, related to Paleoproterozoic Era. Fracture system led to the implantation of two karstic marble phases, being the oldest from Cambrian Period and the most recent from Tertiary/Quaternary Period. Porosity is secondary to fractures, fissures and crushed zones which act as hydraulic channels for groundwater flow. Major geophysics-defined conducting lines are controlled by normal fractures and faults, whose characteristics are typical of *graben* and *horst*. Groundwater flow is characterized by fractures which enlarged by the karstic phenomenon dissolution, and then become closer as deeper they are. Water level is not lower than 5 m or higher than 90 m, averaging by 30 m all over the area.

¹ Indústrias Nucleares do Brasil S/A - INB, End.: Rua Ildefonso Albano, 1189 Apto 801 – Meireles – CEP 60115-000, Telefone: (85) 226-4612, email: jralcantar@veloxmail.com.br.

Palavras-Chave - jazida de fosfato e urânio; aquífero cárstico; condutor hidráulico.

INTRODUÇÃO

A jazida fósforo-uranífera de Itataia, com reservas lavráveis da ordem de 9 milhões toneladas de P_2O_5 e 79,3 mil toneladas de U_3O_8 é a segunda jazida de urânio mais promissora do país, a outra, já em fase de mineração e produção, está situada na Mina de Lagoa Real/Caetitê-BA.

O sistema aquífero da área de estudo ocorre em um ambiente de rochas metamórficas carbonáticas (mármore e cálcio-silicáticas) e gnáissicas, com metamorfismo da fácies anfibolito e um estilo estrutural com dobramentos isoclinais recumbentes e holomórficos. As rochas encontram-se fraturadas e em parte alteradas, podendo apresentar argilas nas zonas fraturadas, além dos processos da carstificação.

O objetivo deste trabalho é definir o aspecto hidrogeológico da área, no que diz respeito a relação com a recarga, o fluxo da água subterrânea e o estágio do fenômeno carstológico. Intenciona-se também, prever o comportamento hidrogeotécnico do maciço rochoso para subsidiar o futuro projeto de mineração na jazida de Itataia.

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Localização e Acesso

A área de estudo situa-se na parte central da jazida de fosfato e urânio de Itataia, perfaz uma superfície de $1,54 \text{ km}^2$ ($1,4 \text{ km} \times 1,1 \text{ km}$), e localiza-se no limite leste do município de Santa Quitéria, na região centro-norte do Estado do Ceará. O acesso por Fortaleza é feito pela BR-020, percorrendo-se 166 km de estrada pavimentada até a localidade de São José da Macaoca, distrito de Madalena-CE, continuando por mais 27,6 km na CE-366, até Lagoa do Mato, distrito de Itatira, e mais 16,7 km em estrada de revestimento primário até o acampamento de Itataia. Do acampamento, percorre-se 3 km em estrada secundária, na direção NE, até o centro da área (Figura 1), que está delimitada pelas seguintes coordenadas UTM:

MC.39/413.500 mE - 9.495.400 mN

MC.39/413.500 mE - 9.496.500 mN

MC.39/414.900 mE - 9.496.500 mN

MC.39/414.900 mE - 9.495.400 mN



Figura 1 - Mapa de localização

Clima

A região de Itaitaia está sob influência do clima Bsh, segundo a classificação de Köppen, semi-árido, com temperaturas elevadas, e o período chuvoso compreendido entre os meses de janeiro à maio, com precipitações esporádicas em junho e julho. O regime pluviométrico de Itaitaia, caracteriza-se por uma estação chuvosa de fevereiro à abril e uma estação seca, bem acentuada, de julho à dezembro, e as precipitações, durante os anos de 1984 até 1988 se concentraram entre os meses de janeiro e julho, com valores máximos entre março e abril (média de 253 mm).

Itaitaia apresenta temperatura média anual da ordem de 27°C, com oscilações de 1°C, em torno da média, com mínima nos meses de junho à julho (21,5°C) e máxima entre os meses de outubro à dezembro (33°C). (Nuclebrás, [1])

Algumas experiências feitas com tanque “Classe A”, mostraram uma variação de evaporação mensal de 42 a 152 mm, sendo a evapotranspiração potencial média anual da ordem de 1.350 a 1.450 mm. (Lopes Filho, [2])

Relevo

A Depressão Sertaneja e os Planaltos Residuais são duas grandes unidades morfológicas que caracterizam o relevo da região. A jazida de Itataia constitui-se num compartimento rebaixado e embutido entre os níveis elevados dos planaltos, com altitude média de 350 a 580 m. Os planaltos residuais representam compartimentos de níveis mais elevados da área, com altitudes de 650 a 1.000 metros, correspondendo aos maciços montanhosos das serras do Céu, das Cacimbas, da Mata Fome e das Laranjeiras. A serra do Céu é o acidente topográfico mais importante, cota de 1.085 metros, servindo de divisor d'água das bacias hidrográficas dos rios Curu e Groaíras, apresentando uma cobertura vegetal mais densa que a do pediplano da depressão circunjacente. (Nuclebrás, [1])

O Projeto RADAMBRASIL caracterizou as unidades geomorfológicas e destacou as seguintes etapas de evolução do relevo regional: a) os níveis cimeiros tabulares conservados nas serras, ou planaltos residuais, representam restos da mais antiga superfície de aplainamento do relevo regional, desenvolvida provavelmente no Terciário Médio, sob condições secas (Figura 2); b) no decorrer do Cenozóico Superior sucederam-se períodos de dissecação e pediplanação, acompanhados por reativações crustais. A predominância atual de formas aguçadas e a existência de mata sobre solos podzólicos nos topos mais elevados denota os efeitos de uma fase úmida responsável pelo desmonte deste aplainamento; c) durante o Pleistoceno, o retorno dos processos típicos de clima semi-árido provocou o alastramento dos níveis erosivos rebaixados e a conseqüente elaboração da superfície de piso regional, presentemente exposta nos setores setentrional e ocidental da Depressão Sertaneja. (Nuclebrás, [1])

Hidrografia

Os principais cursos d'água que compõem a rede de drenagem do município de Itatira constituem setores das bacias hidrográficas dos rios Jaguaribe, Acaraú e Curú. Na região de Itataia o sistema hidrográfico mais importante é o da bacia do rio Groaíras, pertencente ao sistema Acaraú. O padrão de drenagem mais característico é o retangular a montante e sub-dentrítico a jusante em direção à Depressão Sertaneja. (Nuclebrás, [1])

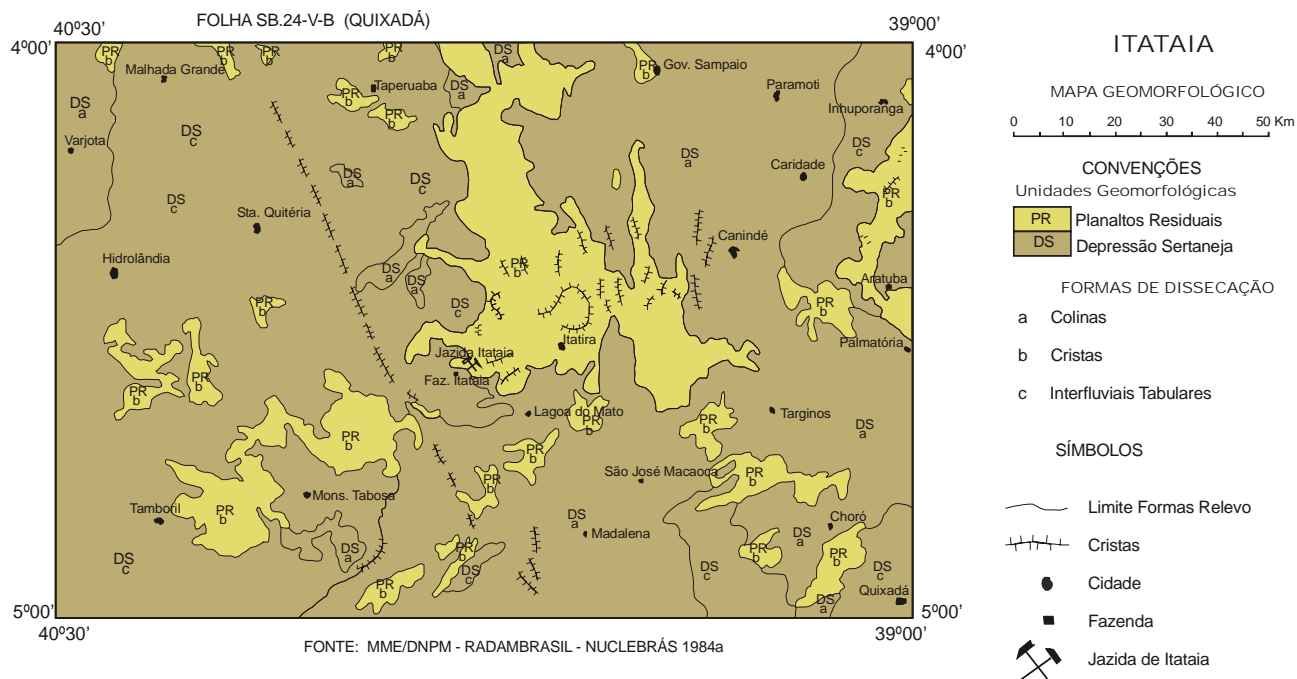


Figura 2 - Mapa geomorfológico

REVISÃO DE LITERATURA

Gustafson [3] entende por aquíferos de rocha cristalina as “rochas ígneas e metamórficas fraturadas com porosidade e permeabilidade de matriz desprezível, que sinonimizam à rocha dura”. A condutividade hidráulica, nesse tipo de rocha, varia por várias ordens de magnitude, dentro da mesma unidade, e frequentemente, dentro de distâncias curtas. A razão para isto, é que não são as rochas que transmitem a água subterrânea, mas as fraturas e fissuras que formam aberturas condutivas pela matriz basicamente impermeável, ao contrário da definição clássica de aquífero, onde o condutor da água subterrânea é relacionado à formação em lugar das estruturas dentro dela. Neste sentido restrito, aquíferos não existiriam nas rochas fraturadas, e para a maioria dos propósitos práticos o termo aquífero deveria ser substituído pelo termo condutor hidráulico, que inclui características condutivas tais como fraturas, zonas de fraturas e o regolito em áreas tropicais. Essas zonas de fraturamento são desenvolvidas, ou reativadas, depois da formação da própria rocha. Assim, um poço produtivo em uma rocha fraturada sempre tem, pelo menos, um condutor hidráulico principal para a água subterrânea.

Manoel Filho [4] aplica a denominação de condutor hidráulico para o sistema “poço-blocos-fendas associadas”, formado pelo poço, pelos blocos (*a priori* não porosos), os quais são delimitados pelas fendas, direta ou indiretamente conectadas com o poço, e pelas próprias fendas conectadas com o poço. Quando um poço perfurado no sistema de aquífero fraturado, fissural ou

cárstico, não intercepta qualquer fenda produtora então os parâmetros do condutor hidráulico são nulos mas nem por isso o aquífero deixa de existir.

Os calcários são especialmente mais suscetíveis à dissolução que os dolomitos, pois a solubilidade da calcita é maior que a da dolomita. O processo de formação do carste envolve a chamada cascata de gás carbônico, que é captada pela água da chuva na atmosfera e se dissolve nas gotas. Quando a chuva alcança o terreno ela percola no solo e capta mais CO₂ para formar uma solução fraca de ácido carbônico: $H_2O + CO_2 = H_2CO_3$. As aberturas no substrato aumentam de tamanho e começam a desenvolver um sistema de drenagem subterrânea, por onde passa mais água e acelera a formação do carste.

A capacidade de infiltração é função da permeabilidade que depende da porosidade da rocha e do seu grau de fraturamento. A dissolução ocorre através da água que, ao percolar nos solos, enriquece em CO₂ e reage com o calcário para formar bicarbonato de cálcio solúvel, de acordo com a seguinte reação clássica: $CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2$.

ROTEIRO METODOLÓGICO

A determinação da estrutura hidrogeológica, sua extensão, profundidade, e propriedades hidráulicas na área de estudo baseiam-se: a) na coleta das medidas de nível d'água em furos da jazida durante os anos de 1984 a 1987; b) interpretação geológica de superfície e subsuperfície; c) descrição lito-estrutural e características geotécnicas dos tipos de rochas, através de testemunhos de sondagens; d) sondagem geofísica (eletroresistividade) e perfis eletromagnéticos (VLF-*Very Low Frequency*); e) determinação das características hidrogeológicas através de ensaios de bombeamento; f) balanço hídrico e apresentação de mapa sinóptico da potenciometria.

As medidas de nível d'água, com medidor de nível, foram realizadas nos furos durante os anos de 1984 a início de 1988. Essa medição foi iniciada em 1984, através de 18 furos, sendo 7 localizados na zona elevada e 11 na zona da baixada, finalizando, no período de 1988, com medidas em 8 furos na zona elevada e 20 furos na baixada. Os dados pluviométricos foram obtidos também no mesmo período.

Na área foram realizados dois ensaios de bombeamento em dois furos de sondagens, F-202 (zona da baixada) e F-206 (zona elevada), de longa duração e de curta duração, respectivamente. Foi realizado ainda, um programa de geofísica-eletroresistividade e eletromagnético VLF-*Very Low Frequency* - (Saad, [5]), objetivando estabelecer a configuração da superfície hidrostática, elaborar o mapa piezométrico e definir o arcabouço estratigráfico e estrutural.

GEOLOGIA

Estratigrafia - Grupo Itataia

Os estudos geológicos realizados pela Nuclebrás permitiram reconhecer para a região de Itataia um ambiente geotectônico, representado por metassedimentos que compõem o Grupo Itataia, posicionado no Paleoproterozóico, através dos resultados dos estudos geocronológicos extraídos da bibliografia, relacionando-o ao Ciclo Transamazônico e com efeitos posteriores de remobilização nos ciclos tectônicos subsequentes.

No esquema estratigráfico para a região de Itataia (Quadro 1) as rochas do Grupo Itataia continuam sendo atribuídas ao Paleoproterozóico, o Neoproterozóico (Ciclo Brasileiro) representado pelo granito pós tectônico (não aflorante) da estrutura circular de Morrinhos, a mineralização de fosfato e urânio (colofanito) é conferida ao Cambro-Ordoviciano, os diques básicos do Jurássico e os aluviões e terraços fluviais ao Quaternário. (Nuclebrás [1])

O Grupo Itataia compõe-se de espessa seqüência de gnaisses, quartzitos, metarcóseos, anfíbolitos, calcários cristalinos e rochas cálcio-silicáticas, além de migmatitos de estruturas diversas (Figura 3).

Quadro 1 - Esquema Estratigráfico para a Região de Itataia

| ESQUEMA ESTRATIGRÁFICO | |
|--|--|
| QUATERNÁRIO | Aluviões e Terraços Fluviais – sedimentos conglomeráticos, arenosos e argilosos inconsolidados |
| JURÁSSICO | Diques Básicos - diabásios |
| CAMBRO-ORDOVICIANO | Evento Itataia - minério de colofanito |
| NEOPROTEROZÓICO (Ciclo Brasileiro) | Estrutura Circular de Morrinhos - granitos pós-tectônicos; granitos filoneanos; pegmatitos |
| PALEOPROTEROZÓICO (Ciclo Transamazônico) | Grupo Itataia Formação Alcantil - calcários cristalinos (mármore) e rochas cálcio-silicáticas Formação Barrigas - gnaisses e migmatitos Formação Laranjeiras - quartzitos Formação Serra do Céu - migmatitos, leptitos, gnaisses e anfíbolitos |

Fonte: Nuclebrás [1]

A área de estudo é composta fundamentalmente por gnaisses da Formação Barrigas e calcários cristalinos (mármore) da Formação Alcantil, pertencentes ao Grupo Itataia (Figura 4). Rochas pegmatóides e epissienitos (sensu lato) encontram-se associados a seqüência sob a forma de filões e veios dispostos discordantes a subconcordantemente à estruturação regional. A rocha fosfática, denominada de *colofanito*, por conter cerca de 80% de colofana (variedade criptocristalina da apatita) na sua constituição mineralógica, representa o principal minério da jazida.

Mineralização de Fosfato e Urânio

Na jazida de Itataia são três os principais tipos litológicos mineralizados em fosfato e urânio: o colofanito, minério principal, a brecha carbonosa e epissienito. Porém, a mineralização ainda ocorre de modo disseminado nos mármore, cálcio-silicáticas e gnaisses, preenchendo fraturas e planos de foliação. O colofanito constitui a principal litologia mineralizada de Itataia. Macroscopicamente, apresenta-se como uma rocha maciça, às vezes vacuolar, formada por material fosfático de coloração castanho-avermelhada, contendo inúmeras inclusões de cristais de feldspato esbranquiçado, parcialmente alterados.

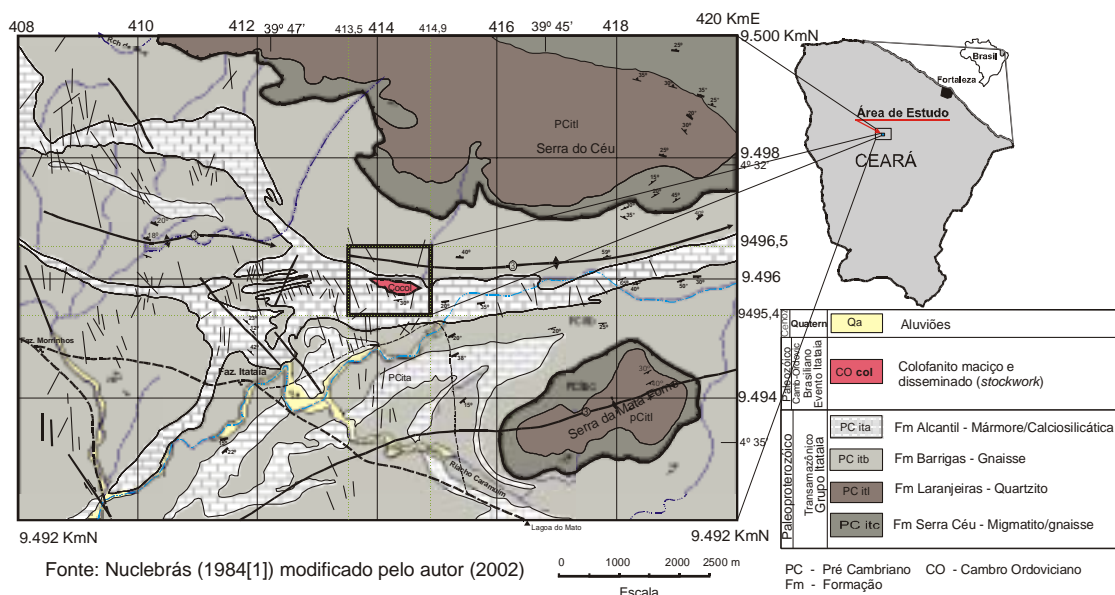
Atualmente não foi identificado nenhum mineral de urânio no minério de Itataia, exceção feita a uma única amostra de epissienito, na qual encontrou-se coffinita - $U(SiO_4)(OH)$ - semelhante em aparência à uraninita. Acredita-se que, o urânio está presente no minério de Itataia como elemento vicário, substituindo o cálcio na estrutura da apatita ou do zircônio na rede do zircão e ainda encontra-se adsorvido nas superfícies e descontinuidades internas da colofana, sem constituir mineral. O posicionamento do evento do colofanito no Cambro-Ordoviciano é correlacionado à ocorrência de fragmentos rolados do colofanito nos conglomerados basais da Formação Serra Grande, de idade siluro-devoniana, ou preenchendo os interstícios de rochas pegmatóides epissienitizadas no final do ciclo Brasileiro, de idade eocambriana (Nuclebrás, [1]).

Tectônica

A região de Itataia apresenta estilo estrutural decorrente de uma evolução deformacional polifásica com registros iniciados possivelmente no Arqueano e estendidos até o final do Proterozóico. Regionalmente, no Grupo Itataia, foram reconhecidas 4 (quatro) fases de dobramentos com estilo isoclinal recumbente e eixos orientados na direção NE-SW, evoluindo para dobramentos holomórficos, na mesma direção. Uma tensão NW promoveu ainda o aparecimento de inúmeros *fronts* de empurrão, alguns progredindo até cavalgamento, como a Falha da Serra do Céu, e os dobramentos polifásicos generalizados.

O estágio final do ciclo, após a fase diastrófica, é marcado por reativações para gravidade ao longo dos antigos falhamentos muito freqüentes na área da jazida. As seções geológicas ao longo

das linhas de sondagens mostram que esses falhamentos de gravidade possuem pequenos rejeitos, fatos estes também constatados por levantamento geofísico. (Chamon, [6])



CONVENÇÕES

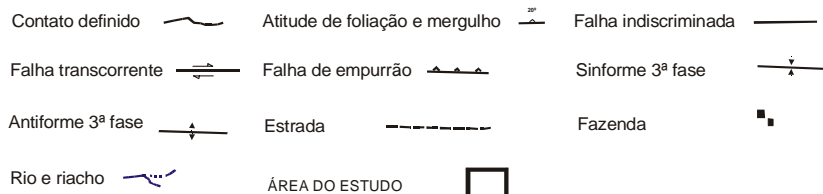


Figura 3 - Mapa geológico regional

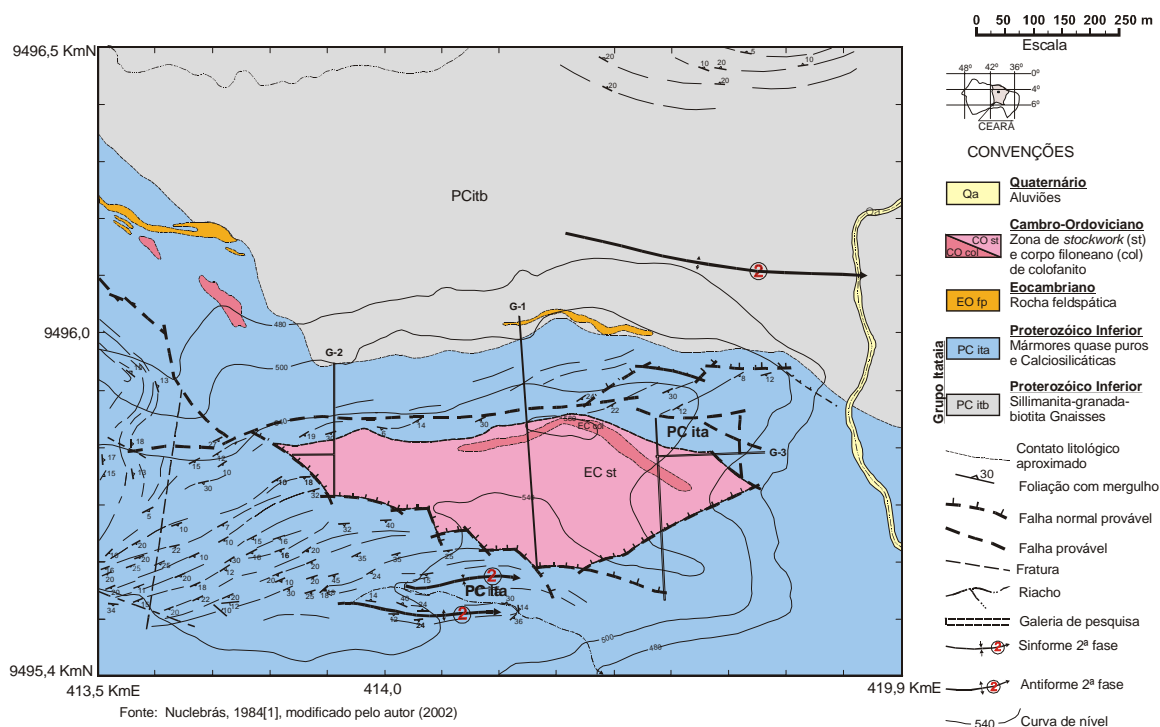


Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo

Morfologia

Duas feições da área podem ser bem distintas morfologicamente, sendo uma elevação e uma zona aplainada, com desnível em torno dos 100 metros. No setor elevado localiza-se o principal corpo de minério de Itataia, enquanto que na zona da baixada afloram principalmente os gnaisses. Na área de estudo, o corpo principal de minério, situado aproximadamente entre as cotas 340 e 585 m, apresenta em planta, uma forma grosseiramente elíptica, cujo eixo maior e alongado segundo a direção E-W, atingindo 800 x 250 metros de dimensões. Outros corpos menores, descontínuos, alinhados segundo a direção NW-SE, afloram na zona da baixada.

Estruturalmente, a mineralização está posicionada na charneira antiforme de dobramento holomórfico F₂, cujo eixo com direção E-W, apresenta um caimento suave para leste acompanhando os dobramentos regionais. O controle da mineralização é tipicamente lito-tectônico, onde além do controle estrutural existe a afinidade da mineralização pela seqüência carbonática (Formação Alcantil), que se caracteriza pela abundante quantidade de colofanito (rocha constituída de 80% de colofana-apatita criptocristalina), preenchendo fraturas nos mármore, tipo *stockwork*. (Nuclebrás, [1])

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

Características Geométricas (Espessuras)

A unidade de rocha carbonática consiste de mármore calcítico quase puro, mármore dolomítico e rocha cálcio-silicática, da Formação Alcantil com espessura variando, em média, de 40 a 150 m, e as rochas que compõem a unidade da Formação Barrigas referem-se a biotita gnaisses com sillimanita e porfiroblastos de granada, constituindo a unidade de maior representatividade regional, e a área possui espessura variando de 10 a 60 m, conforme observada em seções geológicas verticais.

Na região ocorrem duas zonas de carstificação distintas, sendo uma localizada na porção centro-sul, parte elevada ou zona da serra da região da jazida, onde ocorre a principal mineralização de fosfato e urânio de Itataia. Neste local as fraturas cársticas estão preenchidas pela rocha mineralizada (colofanito), na forma de *stockwork e amas*, e também por material silte-argiloso de alteração das próprias litologias. A segunda zona de carstificação, principal área de recarga, está localizada principalmente na porção sudoeste da área de estudo, também na zona da serra, isenta de mineralização de fosfato e urânio, encontra-se bastante fraturada, com fraturas alargadas e basculamento de blocos, originados da ação da dissolução.

Condutividade Hidráulica e Coeficiente de Armazenamento

As características hidrogeológicas da área, evidenciam a existência de dois comportamentos diferenciados, porém os dois possuem baixa condutividade hidráulica e armazenamento. Um situado na porção norte da região, onde ocorrem os biotita-gnaisses com intercalações de mármore, que apresentam-se pouco alterados e fraturados, sem alteração sensível e sem material de preenchimento, com a condutividade hidráulica média da ordem de $1,6 \cdot 10^{-3}$ m/h. O outro comportamento, na porção sul da área, onde ocorrem os mármore com *colofana* e com intercalações de colofanita, muito alterados e fraturados, com valores médios de condutividade hidráulica da ordem de 1,9 a $2,7 \times 10^{-5}$ m/h para o maciço de classe III, de $5,0 \cdot 10^{-5}$ m/h para o maciço de classe II, e uma tendência a rápido esgotamento devido a um aquífero do tipo confinado e com reduzido armazenamento. (IPT [7])

Embora o maciço na porção sul seja mais fraturado, supõe-se que a baixa permeabilidade se deva à presença de material de preenchimento nas fraturas, colmatando-as.

A piezometria na área de estudo, a partir de medidas de nível d'água em alguns furos de sondagens, mostra que o fluxo da água subterrânea tem sentido geral de sul para norte, com o nível freático em torno da cota 480 metros (profundidade em torno de 90 metros), época da estação chuvosa, na parte central, e porção elevada da área do corpo mineralizado.

No estudo de geofísica realizado na área, a piezometria mostra também uma tendência geral do fluxo da água subterrânea de sul para norte (Saad, [5]). No entanto, o fluxo no sentido sul, principalmente na zona de recarga, não é evidenciado porque não existe informações de furos nessa parte da área.

BALANÇO HÍDRICO DA ÁREA DE ESTUDO

A precipitação média anual, para o período de 1984 a 1988, foi de 823,68 mm, sendo que os valores para a evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração real (ETR) foram de 1.542,65 mm e 652,65, respectivamente, com infiltração efetiva (I_{ef}) de 56,32 mm. Para o Índice Térmico Anual (I) foi encontrado o valor de 149,53, tendo sido consideradas as temperaturas médias mensais estimadas por Regressão Linear Múltipla para a região de Santa Quitéria-CE (mínima de 25,9°C e máxima de 28°C).

Sendo a reserva renovável de $0,05632 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{m}^2$, de área de recarga e considerando essa mesma área, na porção sudoeste da área, como sendo de aproximadamente 400 x 250 m, o que equivale a uma superfície de 100.000 m^2 , então o cálculo aproximado para a reserva renovável seria de: $0,05632 \times 100.000$, resultando no valor de $5.632 \text{ m}^3/\text{ano}$.

Medidas de Nível d'Água

As medidas mensais diretas de nível d'água (N.A.), foram realizadas no período de 1984 a início de 1988, através dos furos de sondagens, localizados no mapa da Figura 5. A cota do nível freático médio na zona da baixada está em torno de 450 e 455 metros e na zona da serra apresenta-se muito variável, com valores médios compreendidos entre as cotas 490 e 455 metros (Figura 6).

Nos anos de 1984 a início de 1988, a estação chuvosa ocorreu de janeiro a julho com precipitações máximas nos meses de março e abril, correspondendo a 384 e 433 milímetros, respectivamente. Para o período de 1984 a 1987 a média anual foi de 791 milímetros.

No levantamento geofísico, realizado em 2002, as sondagens elétricas permitiram definir as profundidades do nível de água para cada local investigado, cujos valores encontrados se situam entre um mínimo de 5 metros e um máximo de 60 metros, com um valor médio de 30 metros para toda a área investigada.

ESTUDOS GEOTÉCNICOS

Parâmetros Geotécnicos

Os estudos geotécnicos na área de estudo visaram a obtenção de elementos que definissem o aspecto geológico-geotécnico do maciço da Jazida de Itataia, onde foram obtidos parâmetros de alteração, fraturamento, RQD (*Rock Quality Designation*), descontinuidades e ângulos de fraturas (Alcântara e Silva, [8]). Alcântara supõe que, a percolação da água subterrânea ocorra nas zonas de alteração e fraturamento das rochas, até profundidades onde houve o fenômeno cárstico.

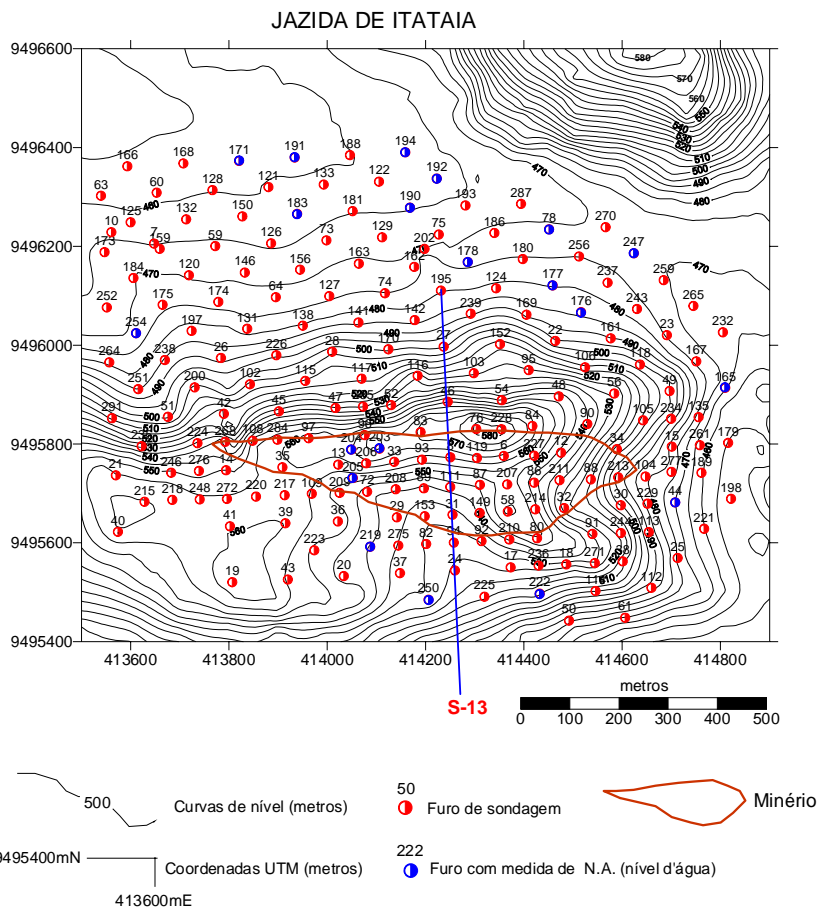


Figura 5 - Localização de furos com medidas de N.A. (1984-1988)

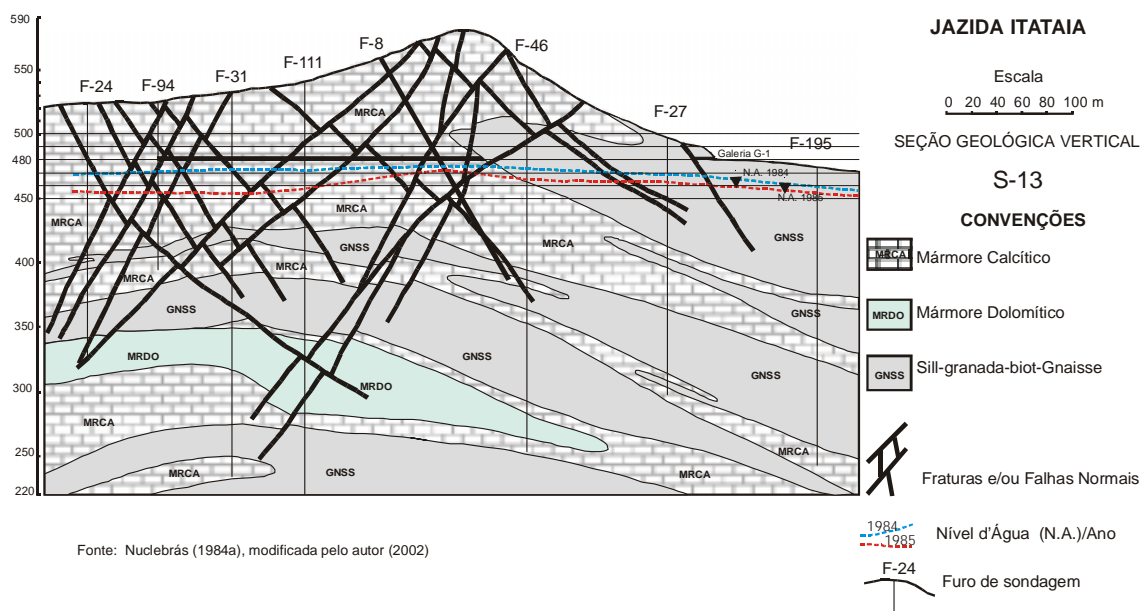


Figura 6 - Seção Geológica Vertical S-N (S-13)

Essa percolação pode, no entanto, ser reduzida se houver colmatção das fraturas por material silte-argiloso.

A partir da conjugação dos parâmetros geotécnicos as rochas da área de estudo foram divididas em três classes de maciço: Classe I, que caracteriza um maciço de rocha sã ou praticamente sã, pouco ou medianamente fraturado; Classe II, que possui qualidades geotécnicas intermediárias às do maciço classe I e classe III; e Classe III, caracterizando um maciço rochoso com qualidades geotécnicas pobres, muito alterado e fraturado (Figura 7).

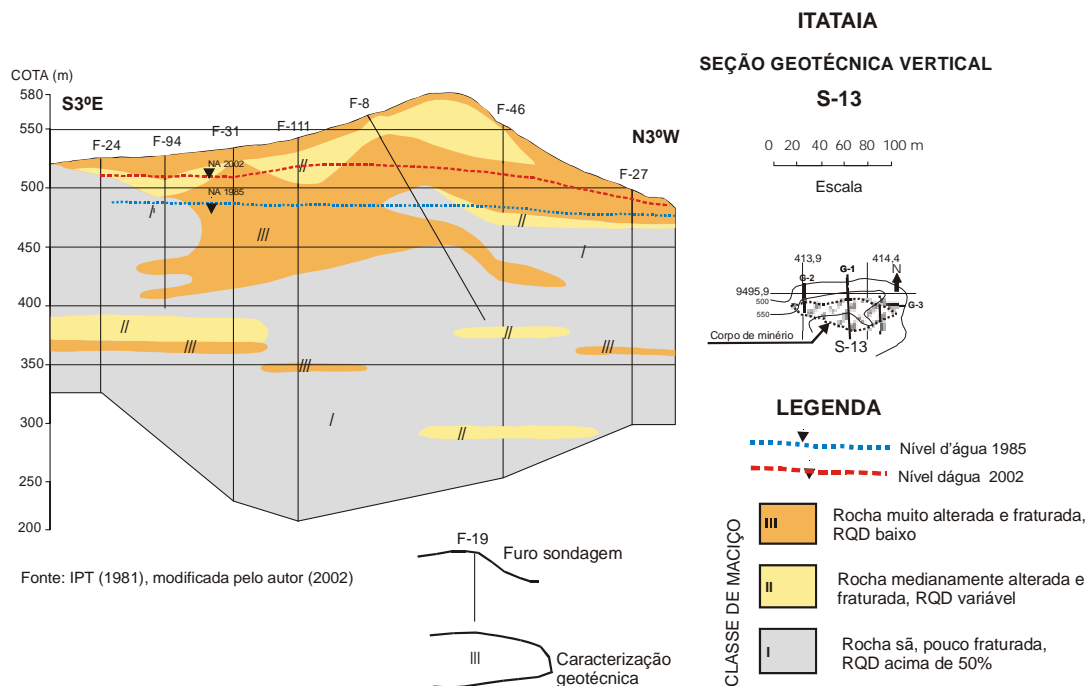


Figura 7 - Seção geotécnica vertical (S-13)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Condutividade Hidráulica e Superfícies Potenciométricas

As condutividades hidráulicas no domínio dos biotita-gnaisses, a norte, da ordem de $1,6 \cdot 10^{-3}$ m/h, são sensivelmente superiores às dos mármore, a sul, que variam de $1,9$ a $2,7 \cdot 10^{-5}$ m/h), estes mais alterados e fraturados (maciço classe III), sendo que nos mármore medianamente alterados (maciço classe II) a condutividade hidráulica alcança o valor de $5,0 \cdot 10^{-5}$ m/h. Esse decréscimo pode ser ocasionado pelo preenchimento de material silte-argiloso nas fraturas.

A tendência geral do fluxo da água subterrânea é na direção de sul para norte e nordeste, podendo variar para leste ou sudeste, para oeste e ainda para sul, caracterizando zonas de convergência e de divisores de água, conforme mostra a Figura 8, com dados de medidor de nível

d'água para o ano de 1986. A recarga da área é totalmente pluviométrica e o fluxo ocorre em superfície e em subsuperfície sendo condicionado pelo sistema de fraturas subverticais abertas e pelo divisor topográfico da zona da serra (Figura 9).

A área de estudo apresentou uma média anual de precipitação pluviométrica de 823,68 milímetros, evapotranspiração potencial de 1.542,65 milímetros e real de 652,65, para uma infiltração efetiva de 56,32 milímetros. Se for considerada uma superfície de 400x250 metros na principal área de recarga, situada na porção sudoeste e onde a carstificação é mais intensa, a reserva renovável encontrada para a infiltração efetiva seria de 5.632 m³/ano.

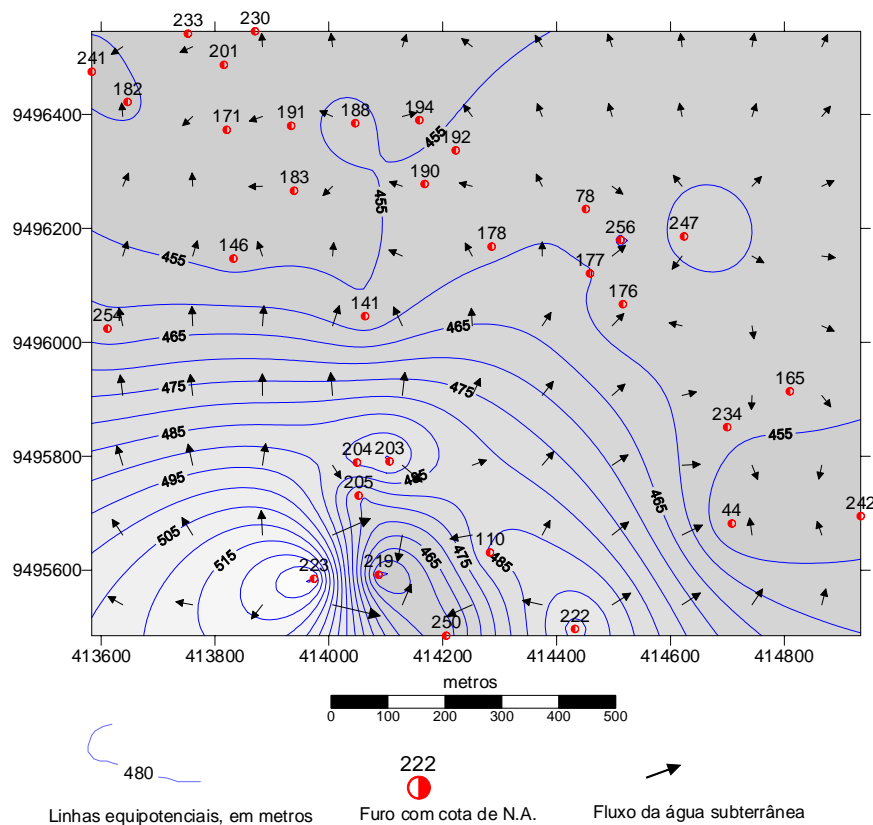


Figura 8 - Linhas equipotenciais e fluxo da água subterrânea – Ano 1986

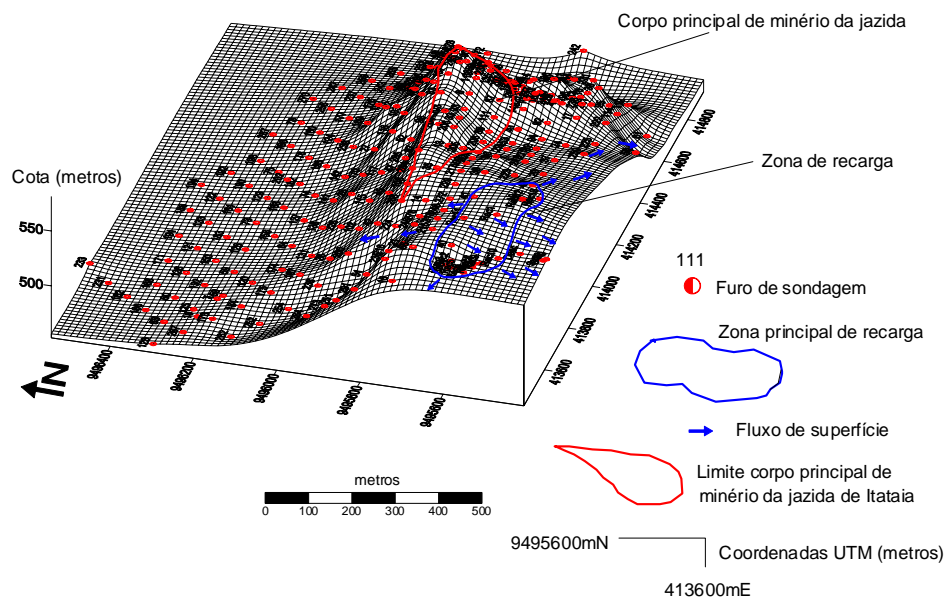


Figura 9 - Bloco diagrama com zona de recarga e corpo de minério

Geofísica - Eletoresistividade e V.L.F.

As sondagens elétricas permitiram definir as profundidades do nível de água para cada local investigado, cujos valores encontrados se situam entre um mínimo de 5 metros e um máximo de 60 metros, com um valor médio de 30 metros para toda a área investigada. O gradiente hidráulico estimado se situa entre 6% e 2%, respectivamente. O fluxo da água subterrânea evidencia uma orientação predominante de sul para norte, sendo que na porções centro-sul e sudeste, mostra uma linha de fluxo no sentido sudeste.

Os principais eixos condutores, da interpretação do levantamento eletromagnético (VLF), encontram-se orientados segundo a direção principal de $N70^{\circ}E$ a $N80^{\circ}W$ e, secundariamente, de $N10^{\circ}E$ a $N30^{\circ}W$. Os mergulhos dessas faixas condutoras, variando entre 70 e 85 graus, evidenciam uma boa condutibilidade eletromagnética, caracterizando a existência de fraturas hidráulicas que orientam grande parte do fluxo da área. As características tectônicas dos falhamentos definidos pelas sondagens elétricas e pelo levantamento VLF, são típicos de um sistema de falhas escalonadas estilo *graben e horst*. (Saad, [5])

Processos de Carstificação, Área de Recarga e Mineralização

Na área de estudo o nível d'água na parte elevada da jazida, onde se situam os mármores, atingem profundidades médias em torno de 40 a 90 metros, correspondendo a cotas entre 450 e 480

metros. Na baixada a profundidade do nível d'água varia de 5 a 30 metros, em média, com cotas de N.A. entre 440 e 450 metros. O nível d'água cárstico nos mármore não constitui um nível de base porque ocorre alteração e fraturamento até pelo menos a cota de 400 metros. Toda a drenagem de superfície, da área, é direcionada para o rio Groaíras (bacia do Acaraú), de leste para oeste, cuja calha está em torno da cota de 300 metros e, possivelmente, constitui o nível de base da região.

O processo de carstificação na área de estudo apresenta duas etapas de desenvolvimento, sendo a fase mais antiga responsável pelas aberturas de dissolução de fraturas e cavidades, e que foi preenchida pelo material colofânico e calcita recristalizada em grandes cristais, onde se situa o corpo principal de minério fósforo-uranífero da jazida de Itataia. A mineralização (colofanito), que preencheu as cavidades e fraturas carstificadas preexistentes, é atribuída, até o momento, ao Cambro-Ordoviciano e, por isso, o autor sugere para o carste mais antigo de Itataia como sendo do Cambriano. Assim, associado a material de alteração das próprias rochas, a carstificação praticamente cessou nessa área do corpo principal de minério, embora a infiltração pluviométrica e falhas de gravidade reativadas possam permitir ainda alguma dissolução em alguns locais.

A segunda fase da carstificação é mais recente, e ainda ativa, localizada a sudoeste da área de estudo e isenta de mineralização de colofanito. Esta fase é provavelmente do Cenozóico, podendo ser correlacionada a diversos eventos extraídos da bibliografia, tais como: a caracterização geomorfológica do Projeto RADAMBRASIL (Nuclebrás, [1]), em que os restos da mais antiga superfície de aplainamento foi desenvolvida provavelmente no Terciário Médio, sob condições secas, e no decorrer do Cenozóico Superior sucederam-se períodos de dissecação e pediplanação, acompanhados por reativações crustais; e ainda às idades de algumas regiões cársticas da Bahia, Minas Gerais e São Paulo, onde indicam idades terciárias e quaternárias, desenvolvidas em rochas carbonáticas neoproterozóicas. (Karmann, [9])

As fraturas abertas na zona de recarga, são provavelmente associadas à neotectônica do Terciário, com reativação de falhamentos pretéritos e o clima, com suas variações, escultaram o relevo atual e o processo cárstico.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia dos trabalhos permitiu caracterizar a hidrogeologia da área estudada, delimitando-se as profundidades das zonas de alteração e fraturamento, em até aproximadamente 150 metros, que coincide com o limite do corpo principal de minério de fosfato e urânio da jazida de Itataia. O fluxo da água subterrânea ocorre preferencialmente de sul para norte/nordeste, embora varie para sul e sudeste nos cantos sudoeste e sudeste da área, e é controlado pelo divisor topográfico, pelas fraturas, fissuras e superfícies de acamamento, principalmente na zona elevada

onde dominam os mármore. As transmissividades são sensivelmente superiores na porção norte da área de estudo, zona da baixada onde ocorrem os gnaisses, muito embora as fraturas sejam mais freqüentes nos mármore da porção elevada. Essa diminuição da transmissividade nos mármore pode ser explicada pela colmatagem das fraturas através de material silte-argiloso.

O método geofísico de eletroresistividade e eletromagnético - VLF definiu eixos condutores que evidenciam um sistema de falhamentos escalonados com faixas de boa condutibilidade eletromagnética, caracterizando a existência de fraturas hidráulicas que orientam grande parte do fluxo hidrodinâmico da área de estudo.

O termo aquífero, que na definição clássica significa rocha ou sedimento poroso e permeável, que armazena e transmite volume significativo de água subterrânea, poderia ser classificado neste trabalho como aquífero cárstico limitado para a porção elevada dos mármore, ou condutor hidráulico para toda a área, envolvendo os gnaisses e mármore. A condutividade hidráulica tende a diminuir com a profundidade em face da redução da abertura das fraturas e aumento do espaçamento entre elas.

Os dois processos de carstificação da área de estudo, sendo o mais antigo na porção centro-sul, onde se localiza o corpo principal de minério, provavelmente do Cambriano, e o mais recente na porção sudoeste, onde se encontra a principal área de recarga, idade atribuída ao Terciário/Quaternário, devem estar controlados pela tectônica compressiva regional, tanto do Brasileiro como do neotectonismo do Terciário, através de reativações de falhas/fraturas pretéritas.

Para uma melhor definição do carste da área de estudo é indispensável a datação dos materiais de deposição nos condutos e dos travertinos, e a datação do minério de colofanito também é um estudo de suma importância a ser realizado, tanto do ponto de vista genético, como também no auxílio do esclarecimento do carste mais antigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NUCLEBRÁS. *Jazida de Itataia*: relatório de pesquisa mineral. Fortaleza: INB, 1984.330 p.
- [2] Lopes Filho, A. F. *Bases de estudos hidrogeológicos para a região de Itatira*. Nota técnica. Fortaleza: Nuclebrás/DRM, 1977.
- [3] Gustafson G., Krásný, J. *Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance*. Applied Hydrogeology 2(2). 1994. p.64-75.
- [4] Manoel Filho, J. *Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural*.. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 1996. p. 51-71. (Tese de doutoramento).

- [5] Saad. S., Chamon, N. *Levantamento geofísico com o método eletromagnético (VLF) e eletroresistividade na área da jazida de Itataia do Estado do Ceará: relatório de prospecção geofísica*. Texto, anexos e Mapas. Rio de Janeiro: ENGERAD, 2002. 86 p.
- [6] Chamon, N. *Eletroresistividade em Itataia.*: relatório final de projeto. Nuclebrás, 1977. 19p.
- [7] INSTITUTO de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). *Estudos geológico-geotécnicos para projetos de engenharia na Mina de Itataia : município de Santa Quitéria/CE*, Relatório n.º 15-253, São Paulo: INB, 1981. v.1.
- [8] Alcântara e Silva, J. R., Rosa, C. V. *Caracterização geotécnica, geológica, química e reservas da jazida de Itataia*: relatório técnico específico. Nuclebrás, 1988. 131p.
- [9] Karmann, I., Ferrari, J.A. Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), sul do Estado de São Paulo. In: Schobbenhaus, C., Campos, D. A., Queiroz, E. T., Winge, M., Berbert-Born, M. (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. 2000. Disponível em <<http://www.unb.br/ig/sigep/sitio043/sitio043.htm>>