

## Métodos Elétricos, Eletromagnéticos e Gamaespectrométricos Integrados ao Complexo Alcalino de Pariquera-Açu (SP)

### *Combined Electric, Electromagnetic and Gamma Spectrometric Methods Applied to the Pariquera-Açu Alkaline Complex*

Elaine Maria Lopes Loureiro<sup>1</sup> (eloureiro@anp.gov.br), André Rugenski<sup>1</sup> (arugenski@anp.gov.br),  
Marta Silvia Maria Mantovani<sup>2</sup> (marta@iag.usp.br)

<sup>1</sup>Agência Nacional do Petróleo - ANP

Av. Rio Branco 65 - 12° ao 22° andar, CEP 20090-004, Rio de Janeiro, RJ, BR

<sup>2</sup>Departamento de Geofísica - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP, São Paulo, SP, BR

*Recebido em 16 de dezembro de 2010; aceito em 11 de maio de 2011*

#### RESUMO

O complexo alcalino de Pariquera-Açu, localizado no município de mesmo nome (SP) representa um dos complexos alcalinos brasileiros com possibilidade de prospecção mineral. A aplicação de vários métodos integrados contribui para o conhecimento das possíveis regiões de exploração. Nesse contexto foram empregados métodos geofísicos de prospecção visando seu estudo. Os métodos aplicados nesse estudo foram o gamaespectrométrico, o eletromagnético e o elétrico. Estudos geofísicos anteriores visaram o estudo estrutural do complexo, não se atendo a delimitação das variações litológicas. Esses estudos indicaram a presença de uma forte zona de fenitização que geralmente ocorre em complexos alcalinos com presença de carbonatito. Na porção central do complexo alcalino foram aplicados os métodos Eletroresistivo e de Polarização Induzida (IP), com arranjo dipolo-dipolo, no qual se obteve uma imagem da resistividade e cargabilidade em subsuperfície. Os resultados do método dipolo-dipolo indicam a presença de uma litologia resistiva e com alta cargabilidade. Esses fatores somados sugerem, conjuntamente a outros estudos do complexo alcalino, a presença do carbonatito nesse local. A gamaespectrometria subsidia essa afirmação através dos valores de concentração dos elementos radioativos, sendo de 8 ppm para o Tório, e de 3.5 ppm para o Urânio, mesmo sendo tomadas medidas sobre a cobertura sedimentar, de baixa radioatividade.

**Palavras-chave:** Gamaespectrometria; Métodos elétricos; Métodos eletromagnéticos.

#### ABSTRACT

The Pariquera-Açu Alkaline Complex, located in the city of Pariquera-Açu (State of São Paulo), is one of the Brazilian alkaline complexes which has considerable mining potential. The combined use of several methods helped to determine possible areas for exploration. Geophysical prospecting methods were used to assess the exploration potential of these areas. The methods used in this study were gamma-spectrometry, induced polarization and electrical survey. Previous geophysical studies were carried out to better understand the structural evolution of the complex and were not limited to the study of the lithological variation. Gravimetric studies showed a zone of intense fenitization, which is consistent with alkaline complexes with carbonatites. A dipole-dipole survey conducted in the central part of the complex indicated the presence in the subsurface of a resistive lithology with high chargeability. These factors, together with other studies on the alkaline complex, suggest the presence of carbonatite in the area, which is corroborated by gamma spectrometry data, given the concentrations of Th (8 ppm) and U (3.5 ppm) and considering that the measurements were performed over a non-radioactive sedimentary cover.

**Keywords:** Gamma Spectrometry; Electric methods; Electromagnetic methods.

## INTRODUÇÃO

A região do Vale do Ribeira, situada no sul do Estado de São Paulo, tem sido objeto de estudos de importância científica visando algum interesse econômico. Complexos alcalinos são fonte de matéria prima para a indústria e agricultura, devido à presença de elementos raros, enriquecidos em fosfatos, terras raras, e carbonatos. As rochas alcalinas também possuem importância do ponto de vista acadêmico e estrutural, já que podem fornecer informações quanto ao afinamento litosférico.

A alcalina de Pariqueira-Açu já gerou diversos trabalhos geológicos, geoquímicos e geofísicos. Trabalhos geofísicos anteriores que utilizaram dados gravimétricos concluíram que o complexo apresenta-se homogêneo do ponto de vista gravitacional, porém identificaram a presença de uma possível zona de fenitização externa à alcalina, através de um baixo gravimétrico da ordem de 1 a 2 mGal (Rugenski, Mantovani, Shukowsky, 2001).

## INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS

A alcalina de Pariqueira-Açu é uma intrusão aflorante com área de 6 km<sup>2</sup>, sendo parcialmente coberta por sedimentos da Formação Pariqueira-Açu, do Terciário e material aluvionar. Sua localização está nos limites do município de Pariqueira-Açu, no Estado de São Paulo, sendo seu acesso através da BR116, no sentido Registro-Curitiba. Deve ser lembrado que o termo rocha alcalina é definido como sendo rochas ígneas que possuem álcali-feldspato ou que possuem feldspatoides como nefelina, sanidina, entre outros foides (Sørensen, 1974), sendo que a aplicação do termo não indica essencialmente a presença dos elementos químicos alcalinos.

O formato da rocha geralmente indica ações estruturais que moldam sua geometria. Sua forma é ovalada e com eixo maior na direção 45° NW (Algarte, 1972) coincidindo com o eixo do arqueamento de Ponta Grossa. A geologia local é mostrada na Figura 1, onde se observa que a intrusão é cortada por uma falha, 80° NE (Silva e Algarte, 1981). O método de datação K/Ar indicou idades de 92 ± 3 Ma em rochas essexíticas (Morbidelli et al., 2000) se enquadrando no período Cretáceo.

A rocha encaixante teve origem no ciclo Brasília-Pan-Africano (0,9 - 0,5 Ga) (Almeida, Brito Neves, Carneiro, 2000) e pertence à Sequência Turvo-Cajati, Grupo Setuva, (Silva e Algarte, 1981; Campanha e Sadowski, 1999) mais precisamente à subsequência Cajati (Silva et al., 1981), sendo o grupo Setuva de idade Proterozoica Superior (Campanha e Sadowski, 1999). A subsequência Cajati, apresenta como características litológicas: mica-xisto (2,54 - 2,97 g/cm<sup>3</sup>) e mica-quartzo-xisto (2,70 -

2,96 g/cm<sup>3</sup>), sendo que próximo da intrusão alcalina é representada mais especificamente por quartzo-muscovita-biotita-xisto (2,65 - 3,19 g/cm<sup>3</sup>), mica-xisto (2,72 g/cm<sup>3</sup>), filito (2,68 - 2,80 g/cm<sup>3</sup>) e metassilito (2,65 - 2,80 g/cm<sup>3</sup>). Rochas gnáissicas-migmatíticas, do Neoproterozoico, afloram a menos de 5 km da alcalina de Pariqueira-Açu, sendo sotoposta pelo grupo Setuva. O embasamento da alcalina é, portanto, configurado pelos metassedimentos do grupo Setuva e pelas rochas gnáissicas-migmatíticas.

O complexo alcalino de Pariqueira-Açu é composto por três principais tipos de rochas alcalinas: **1. theralito** - associações de minerais de clinopiroxênio, olivina e menores quantidades de K-feldspato, nefelina e mica vermelha, além disso, contém também plagioclásio, Ti-magnetita e apatita; podendo ser encontrada em menor concentração *melatheralito*, rocha que possui clinopiroxênio em 50% do volume em relação ao theralito; **2. essexito** que difere do theralito por ter uma maior quantidade de mica (microfenocristais) e k-feldspato; e **3. sienogabros e sienodioritos**, que incluem feldspatos, plagioclásio, clinopiroxênio e olivina, e mais raramente nefelina, anfibólio e mica. (Morbidelli et al., 2000). O mapa na Figura 1 mostra a distribuição destas rochas no complexo.

Segundo Leinz e Amaral (1995) para a formação do solo existem vários fatores que podem agir: clima, rocha, vegetação, relevo e tempo de atuação de todos estes fatores. O fator clima deve ser posto em evidência, já que a mesma rocha poderá formar solos completamente diferentes se decomposta em diferentes climas. Por outro lado, rochas diferentes podem formar solos semelhantes, quando sujeitas ao mesmo ambiente climático de intemperismo. Essa citação é posta em evidência, pois metades das medidas geofísicas ocorreram nas alterações das rochas. Segundo Kogan, Nazarov e Fridman (1971), as medidas de gamaespectrometria podem indicar a presença de fontes radioativas até 6 m de profundidade, graças à mobilidade iônica dos minerais radioativos ao longo dos milhares de anos. Outro ponto que deve ser mencionado, é que uma camada fina de sedimentos não blindava totalmente a radiação gama, quando liberada pelos elementos filhos <sup>214</sup>Bi (1,76 MeV) e <sup>208</sup>Tl (2,62 MeV). A blindagem depende em muito da geometria e da quantidade de material radioativo presente na jazida. Cinco metros de sedimento não radioativo, ou de baixa radioatividade natural, já seriam suficientes para blindar completamente uma jazida pequena. Nesse caso isso não ocorre, indicando existir realmente um ponto anômalo.

Contemporâneo ao complexo alcalino de Pariqueira-Açu, e localizado no mesmo ambiente climático, o maciço alcalino de Jacupiranga, apresenta dois tipos de rochas predominantes: dunitos e jacupiranguitos. Estudos na área revelam que a alteração ocorrida foi causada pela ação in-

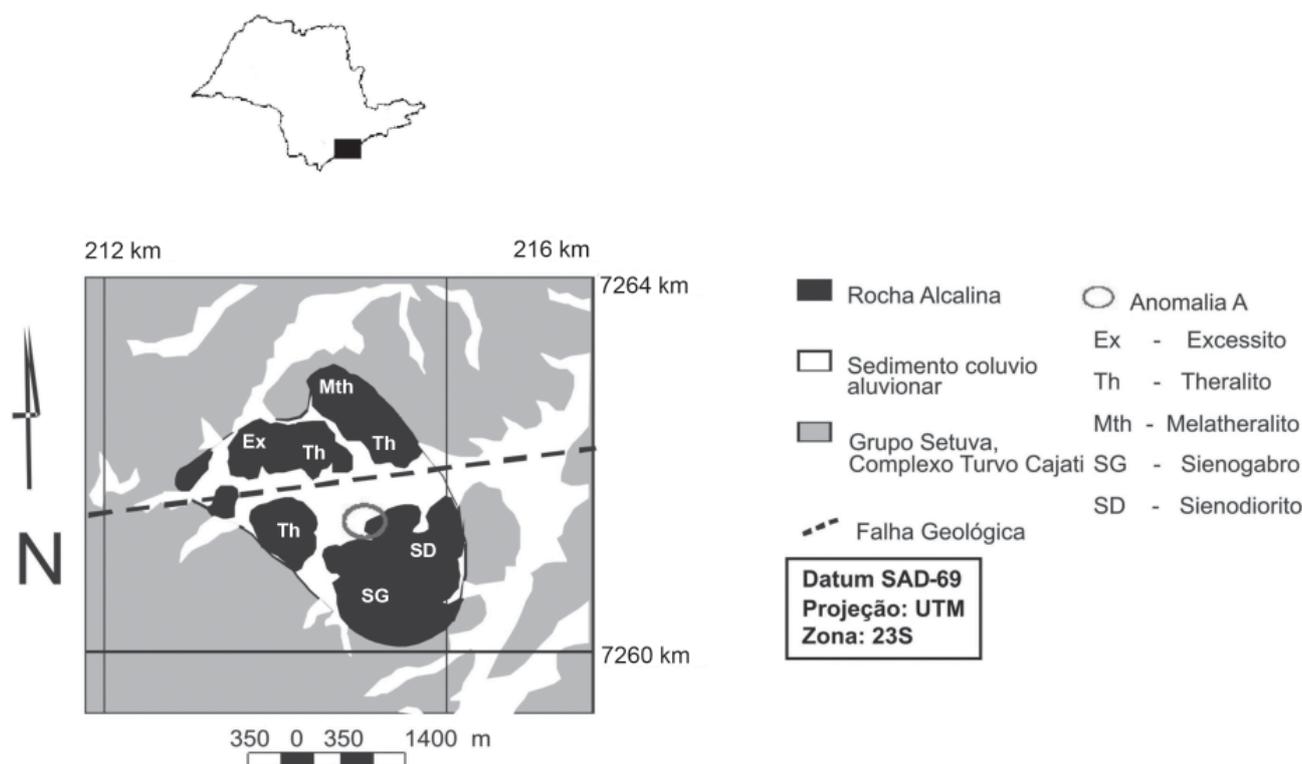


Figura 1. Mapa geológico local da alcalina de Pariqueira-Açu (Ferreira et al., 1987; Morbidelli et al., 2000).

tempérica que gerou um manto laterítico com mais de 40 m de espessura (Oliveira et al., 1988).

Os dunitos (olivina, serpentina, cromita e magnetita), apresentam 3 níveis de alteração: saprólito (serpentina, esmectita e quartzo), Si-boxwork (quartzo e goethita) e laterita (goethita, caulinita e quartzo). Ao longo do perfil, houve perda total de Mg, conservação de Si e concentração residual de Fe, Al, Cr, Ti, P e Zr que se encontram enriquecidos nos níveis superiores da laterita. O Co, Ni, Mn, Ba e Ce mostram seus mais altos teores nos níveis intermediários. A evolução da rocha fresca ao saprólito é laterítica. O “*Si-boxwork*” representa um episódio de silicificação e, finalmente, a cobertura laterítica é enriquecida em elementos não típicos de dunitos (Al, Ti, Zr, V e P), devendo ser resultado de contribuição alóctone.

Pela proximidade das regiões e semelhança na idade, os dois maciços podem ter sido submetidos a situações climáticas semelhantes, e gerado solos semelhantes. A alteração da alcalina de Pariqueira-Açu possui uma coloração máfica (preta) e textura pelítica, a mesma apresentando argilas. Observa-se grande quantidade de argilominerais (esmectita, caulinita etc.) e goethita.

## MÉTODOS UTILIZADOS E ENSAIOS REALIZADOS

Os dados foram adquiridos utilizando uma amostragem espacial média de 500 m distribuída numa área de 22 km<sup>2</sup>, localizada entre as latitudes de 212000 a 217500 m e longitudes 7259500 a 7263500 m, medidos com projeção Universal Transverse Mercator (UTM) na Zona 23S no Datum SAD69. Os instrumentos utilizados foram o EM34-3 (GEONICS) para o método eletromagnético, GS512 (GEOFYSICA) para a gamaespectrometria, e o Syscal Pro para a eletrorresistividade e IP; todos pertencentes ao IAG/USP.

O software usado na redução dos dados de gamaespectrometria foi desenvolvido no GEOLIT em linguagem MATLAB e o programa “*SURFER*” VERSÃO 7 (*Golden Software*, 1999) foi utilizado na interpolação e mapeamento de todos os métodos deste estudo (Métodos Gamaespectrométrico, Eletrorresistivo, IP e Eletromagnético). A célula para a interpolação entre os dados adquiridos foi de 150 m tanto para a técnica de EM34 (eletromagnético) como para o método gamaespectrométrico, com a utilização do algorit-

mo de mínima curvatura. Para o método dipolo-dipolo foi utilizada uma célula para a interpolação de 50 m. Estes parâmetros foram escolhidos após a aplicação de vários testes e optou-se por uma célula representativa considerando pontos próximos ou distantes do levantamento, suavizando as regiões próximas aos perfis e extrapolando entre eles.

## Gamaespectrometria

Os dados brutos gamaespectrométricos foram obtidos com o equipamento GS512 com intervalo de aquisição de 2 min para as contagens de radiações gama. Os elementos que emitem os raios gama detectados são:  $^{232}\text{Th}$  ( $^{208}\text{Tl}$ ),  $^{238}\text{U}$  ( $^{214}\text{Bi}$ ) das séries do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ , e  $^{40}\text{K}$ .

As concentrações do Tório e do Urânio foram determinadas, assumindo que o Complexo Alcalino de Pariqueira-Açu esteja em *equilíbrio secular*. Isto significa que as concentrações dos elementos filhos são as mesmas que as dos pais, já que o Tório leva cerca de 100 anos para entrar em equilíbrio secular; o Urânio, aproximadamente 1 milhão de anos; e o Potássio, alguns dias.

A idade de  $92 \pm 3$  Ma, em rochas essexíticas (Morbidelli et al., 2000), corrobora com a premissa de equilíbrio radioativo. Outro fator também de importância é que algumas medidas realizadas sobre a cobertura sedimentar são representativas, uma vez que a camada de areia de 1 a 5 m de espessura não blindava totalmente a passagem de energia gama. Deve ser mencionado que essa cobertura sedimentar data do terciário, existindo tempo suficiente para a mobilidade de íons de urânio e potássio se deslocarem em direção à superfície ao longo dos tempos. O tório, geralmente, é apenas transportado por ação mecânica, porém em ambiente alcalino ele é solúvel como os demais elementos radioativos.

As curvas de energia dos dados adquiridos em campo são integradas, sendo necessário analisá-las, isolando os elementos  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{40}\text{K}$  em picos de energia de 2,62; 1,76 e 1,46; MeV respectivamente.

Os dados gamaespectrométricos brutos, em contagens por minuto, devem ser reduzidos e transformados em concentrações. As reduções dos dados obedecem basicamente às seguintes etapas: correção do *background* e do efeito Compton, cálculo da matriz sensibilidade do equipamento e cálculo das concentrações de elementos radioativos. Todo o cálculo é efetuado através de algoritmos na plataforma Matlab. Os padrões utilizados (PADs) estão localizados na Cidade do Rio de Janeiro - RJ, no Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD, compostos de oito blocos de concreto (PADs) sendo que em 7 PADs estão distribuídas fontes radioativas dos elementos  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , e no oitavo bloco, apenas o concreto utilizado na sua construção.

As razões de *stripping* basicamente são taxas de energia gama, dos elementos radioativos, que devido ao efeito Compton perdem energia, sendo computadas em faixas energéticas inferiores. Assim sendo um fóton oriundo do tório, pode ser computado como sendo do urânio.

Para as correções de radiação de fundo as equações de calibração levam em conta a interferência de um espectro nas duas outras janelas, proporcional às taxas de contagem:

$$\text{Thc} = \text{Th} - \text{Th}(\text{background}).$$

$$\text{Uc} = \text{U} - \alpha\text{Thc} - \text{U}(\text{background}).$$

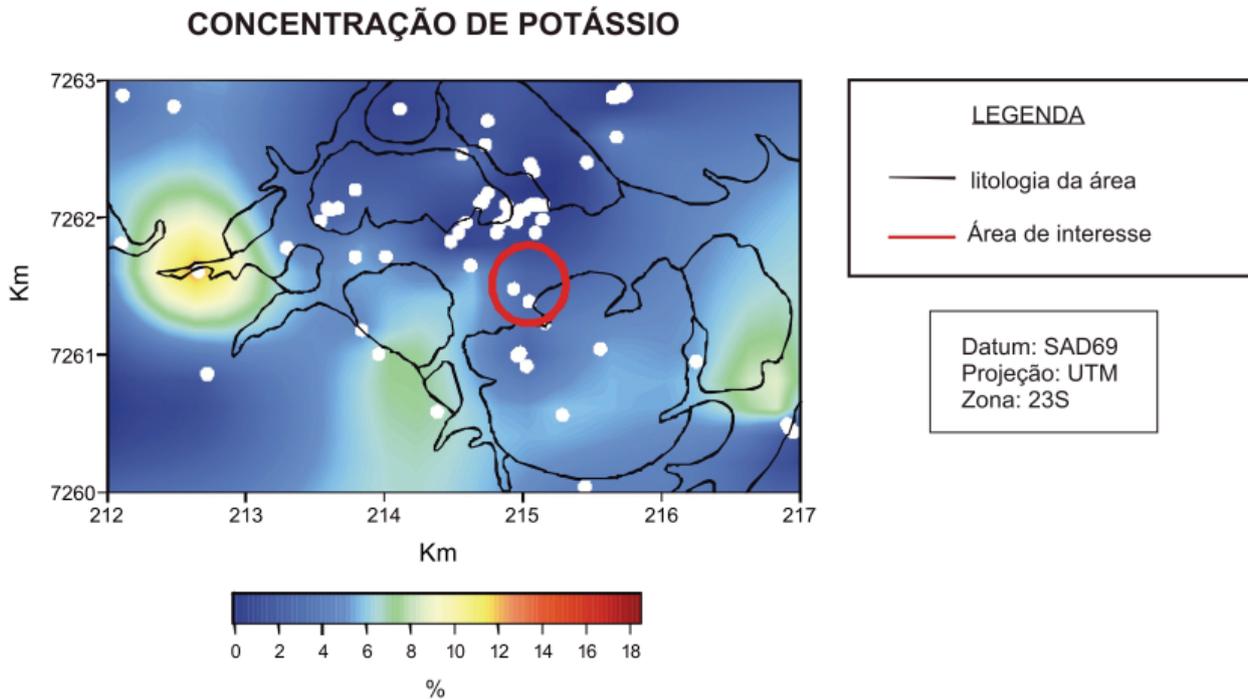
$$\text{Kc} = \text{K} - \gamma\text{Uc} - \beta\text{Thc} - \text{K}(\text{background}).$$

Sendo Th,U,K as contagens medidas nas janelas correspondentes a cada elemento radioativo equivalente. O  $\text{Th}(\text{background})$  é a radiação de fundo do elemento tório. As constantes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  são as razões de *stripping*. Deve ser mencionado que existem razões inversas, denominadas de a, b, c, na qual um fóton ao longo do seu caminho no espaço pode ficar mais energético. No entanto, essa probabilidade é quase nula e, assim sendo, as constantes a, b, c apresentam valores numéricos próximos de zero.

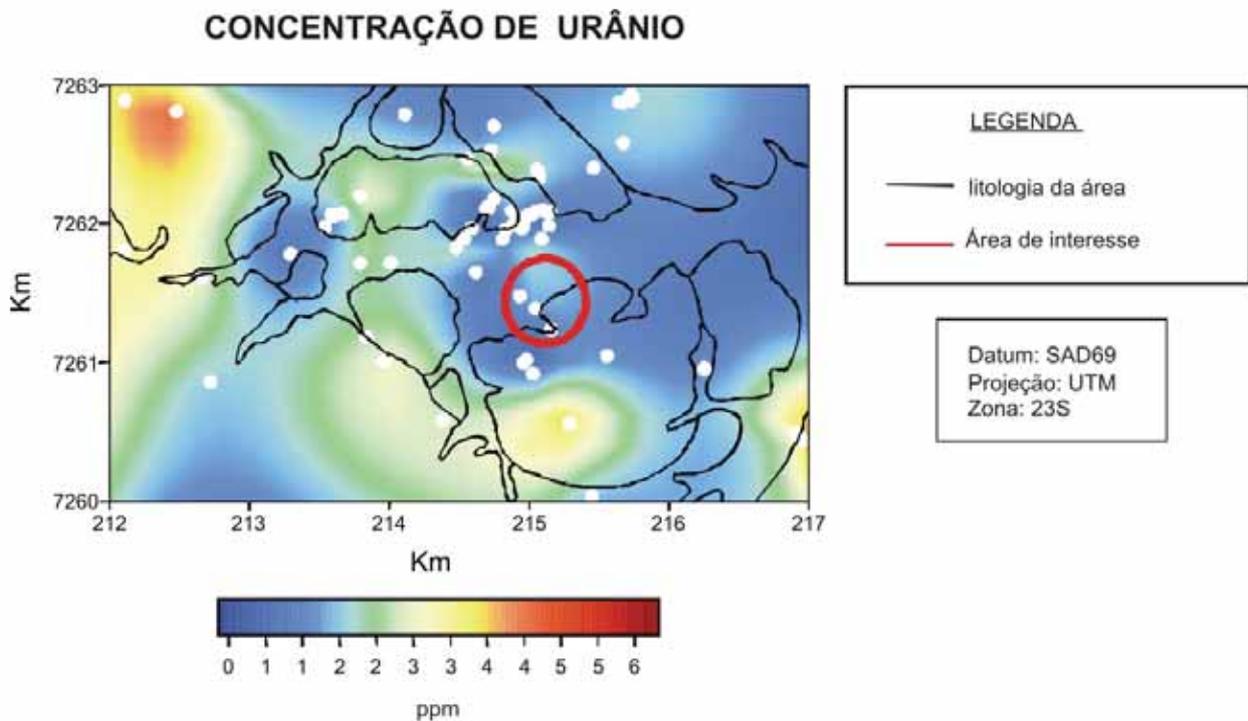
Ambas as razões de *stripping* e as janelas de sensibilidade podem ser determinadas através de medidas em blocos de calibração portáteis. Para a calibração do GS512 foram usadas as concentrações das PADs (Barreto, 1986), sendo o tempo de integração de 5 min para as contagens. As constantes de *stripping* calculadas foram  $\alpha = 0,6823$ ,  $\beta = 0,7282$ ,  $\gamma = 0,9244$ , e,  $a = -0,0125$ ,  $b = -0,0130$ ,  $g = -0,0130$ .

A radiação de fundo, conhecida como *background*, origina-se da radiação cósmica, da radioatividade do equipamento, e provém da radioatividade do decaimento dos produtos do radônio no ar. Esta radiação é medida sobre uma lâmina d'água em um rio ou lago (utilizando um barco). Se este lago ou rio tiver uma largura de 100 m, a radiação do solo circundante se reduzirá a níveis desprezíveis. Esta radiação de fundo deve ser monitorada periodicamente, pois podem ocorrer mudanças significativas em intervalos de poucas horas. Neste trabalho, o *background* foi medido no início do dia no Rio Ribeira de Iguape.

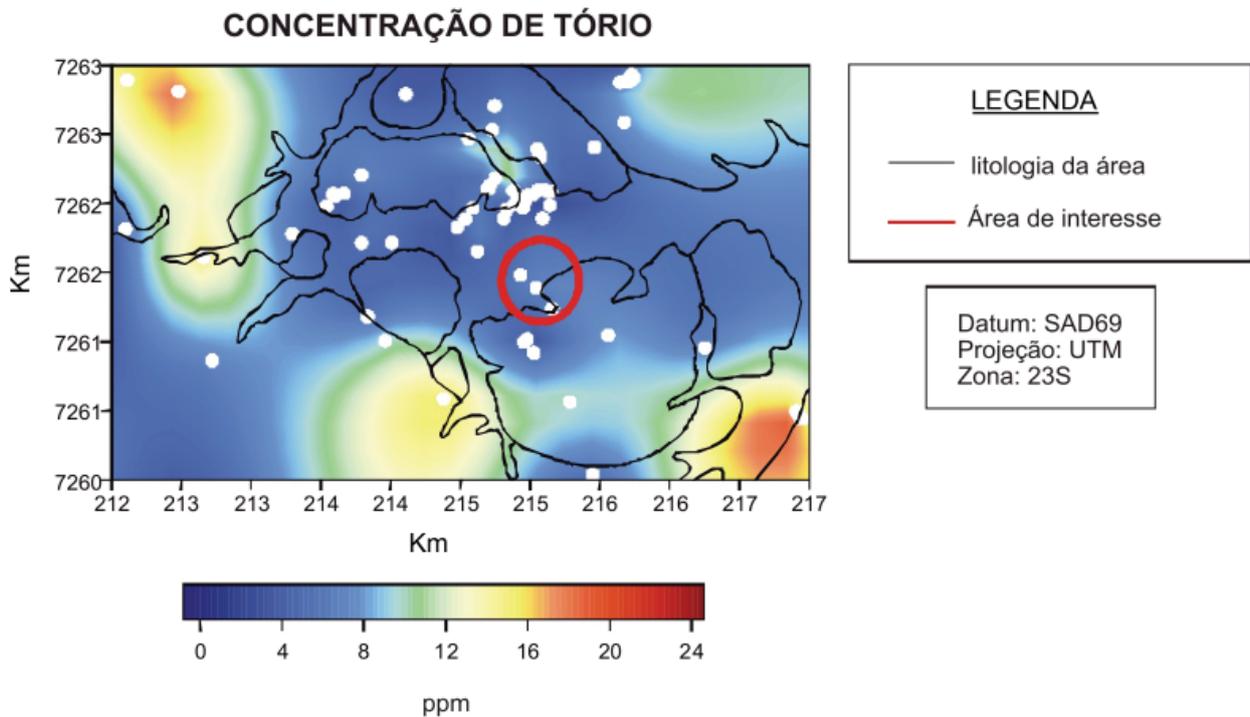
Os resultados em concentração dos elementos radioativos são apresentados a seguir na Figura 2 (a, b e c). As rochas básicas e ultrabásicas possuem baixa concentração radioativa, porém o carbonatito possui alta concentração, principalmente em urânio e tório. Por exemplo, o carbonatito de Juquiá apresenta concentração da ordem de 36 a 86 ppm para os equivalentes urânio e tório medido *in loco* na boca de lavra (Tabela 2). No caso de Pariqueira-Açu, se existir carbonatito, os valores em concentração serão apenas residuais, já que a medida não foi realizada sobre o afloramento, mas sim sobre a cobertura sedimentar.



**Figura 2a.** Distribuição em porcentagem do elemento radioativo  $^{40}\text{K}$ . O mapa geológico está sobreposto com linha mais grossa na cor preta. Os pontos brancos correspondem aos sítios de medida de gamaespectrometria.



**Figura 2b.** Distribuição em porcentagem do elemento radioativo  $^{238}\text{U}$ . O mapa geológico está sobreposto com linha mais grossa na cor preta. Os pontos brancos correspondem aos sítios de medida de gamaespectrometria.



**Figura 2c.** Distribuição (em ppm) do elemento radioativo  $^{232}\text{Th}$ . O mapa geológico está sobreposto com linha branca. Os pontos brancos correspondem aos sítios de medição de gamaespectrometria.

Valores anômalos da ordem de 3 a 8 ppm para U e Th são observados na coordenada 7261,4 km S e 215 km W (anomalia A) e foram medidos sobre o sedimento, que notoriamente possui baixa radioatividade. Esses valores podem ser um indicativo da presença de uma rocha com alta radioatividade abaixo do sedimento. No entanto, a gamaespectrometria apenas indicou possibilidades. Outros métodos geofísicos de penetração, sendo citado os geoeletricos, foram aplicados nessa posição objetivando verificar ou não a presença de carbonatito.

A gamaespectrometria, nos canais do urânio e tório, apenas permitiu discriminar as tendências radioativas nas diversas litologias do complexo alcalino, quando as medidas foram tomadas sobre afloramentos. O resultado é apresentado na Tabela 1. Na Tabela 2 são apresentadas as medidas sobre o carbonatito de Juquiá. Uma forma de comparar as principais razões radioativas entre a anomalia de Pariquera-Açu e o carbonatito de Juquiá é apresentada na Tabela 3.

### Métodos eletromagnéticos

O EM34 consiste em duas bobinas, uma transmissora Tx e outra receptora Rx conectadas por um cabo de ta-

**Tabela 1.** Valores obtidos da gamaespectrometria (em concentração).

Litologia	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	X (km)	Y (km)
Sienogabro	0 - 0,5	0 - 2	2 - 3	215,5	7260,5
Sienodiorito	2 - 2,5	8 - 10	6 - 7	216,0	7261,0
Theralito	1,5 - 2	6 - 8	0 - 1	215,5	7262,7
Melatheralito	1 - 1,5	6 - 8	1 - 2	215,0	7262,5
Excessito	3,5 - 4	6 - 8	2 - 5	213,7	7262,2

manho pré-determinado. O funcionamento do equipamento consiste em aplicar uma corrente alternada na bobina transmissora Tx que produz um campo magnético primário Hp. Este campo magnético varia em função do tempo, induzindo pequenas correntes na terra. Consequentemente, estas correntes produzem um campo magnético secundário Hs que é captado pela bobina receptora Rx. A saída do equipamento lê a condutividade diretamente. A condutividade aparente do meio é determinada por:

Tabela 2. Valores em concentração obtidos da gama espectrometria na alcalina de Juquiá.

X (km)	Y (km)	eU (ppm)	eTh (ppm)	K (%)	U/Th	Th/U
225,752	7.297,057	48,17206	43,75288	0	1,101003	0,908263
225,456	7.296,938	36,59267	86,587	0	0,422612	2,366239
233,595	7.307,744	0,002157	0	0	0	0

Tabela 3. Valores comparativos entre as razões radioativas da anomalia de Pariquera-Açu e Juquiá.

Razões	Pariquera-Açu (anomalia A)	Juquiá (carbonatito)
Th/U	3,5	2,5

$$\sigma_a = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right)$$

onde  $\sigma_a$  é a condutividade de subsuperfície (mho/m = mS/m =  $\text{ohm}^{-1}/\text{m}$ ; Weast, Melvin, Beyer, 1987);  $H_s$  é o campo magnético secundário da bobina receptora;  $H_p$  é o campo magnético primário da bobina transmissora;  $\omega = 2\pi f$ , a frequência angular;  $f$  é a frequência (Hz);  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no espaço livre;  $s$  é o espaçamento entre as bobinas (m).

As bobinas foram usadas em duas configurações: *horizontal*, com dipolos dos campos magnéticos verticais (primário e secundário); ou *vertical*, com dipolos horizontais. O alcance da profundidade de investigação com o cabo de 20 m é de 15 m e de 30 m, para bobinas horizontais e verticais respectivamente e a frequência usada é de 160 MHz.

As medidas foram realizadas com extrema cautela, com relação a fontes perturbadoras do campo eletromagnético. Foi usada uma distância mínima de 100 m das fontes eletromagnéticas fortes, como o carro que estava sendo utilizado na pesquisa. Medições próximas a fios de alta tensão e cercas eletrificadas foram evitadas. Houve uma preocupação adicional em manter as bobinas sempre coplanares.

Os dados de EM34 permitiram identificar uma faixa interna na alcalina mais condutiva, sendo visível nas Figuras 3a e 3b através das isolinhas acima de 20 mS/m. Essa resposta pode ser interpretada como uma variação na concentração de piroxênio na rocha magmática. De fato, na porção sul os minerais de piroxênio possuem comprimento decimétrico e são abundantes. Consequentemente, a dife-

renciação do magma em câmaras magmáticas secundárias possivelmente formou minerais ferrimagnéticos, caracterizando assim este corpo como condutivo. Outra causa do efeito condutivo seria a saturação em água dos sedimentos devido às chuvas. Porém, convém lembrar que a maior parte dos dados encontram-se em áreas de altitude elevada, já que foram amostrados sobre os afloramentos.

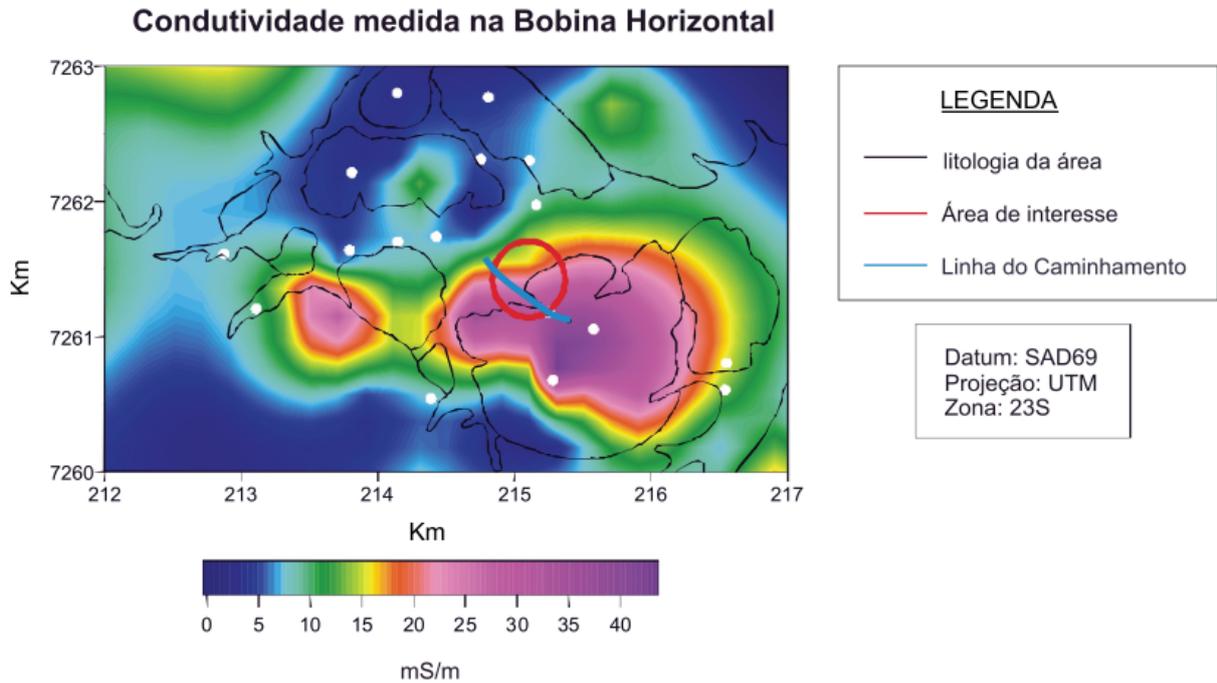
### Método Eletorresistivo e Polarização Induzida (IP)

Os métodos Eletorresistivo e de Polarização Induzida são ferramentas importantes do ponto de vista exploratório. Rochas magmáticas na grande maioria das vezes apresentam alta resistividade e baixa cargabilidade. As rochas sedimentares, desde que com baixa saturação em água e baixa concentração de argila, possuem a mesma resposta, tanto em resistividade como em cargabilidade. Os argilominerais são provenientes da dissolução e lixiviação dos carbonatos segundo Brumati (2008) contidos em complexos alcalinos presentes no domínio Apiaí, como argilito e folhelho, possuem baixa resistividade e alta cargabilidade.

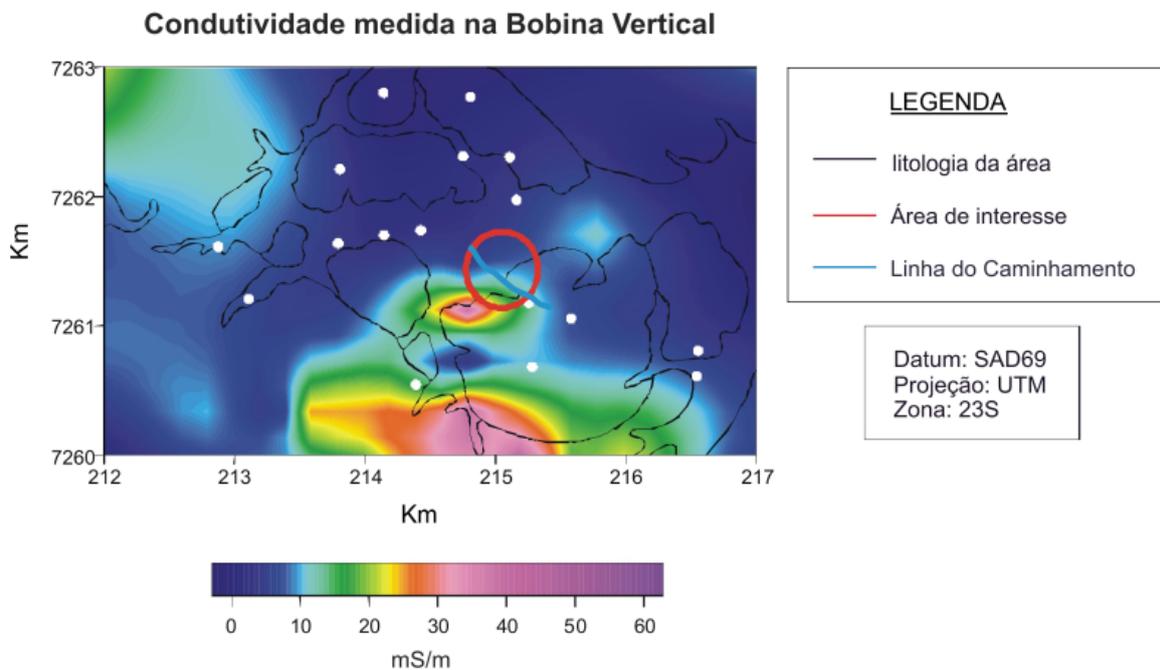
A técnica eletorresistiva aplicada foi o dipolo-dipolo, que permite obter uma imagem da resistividade em profundidade. Nesta técnica os pólos MN (potencial) e AB (corrente) são postos em distâncias constantes (*“offset”* constante) de 20 m entre si, sendo deslocados de forma geométrica indicada na Figura 4.

A investigação elétrica foi realizada entre as coordenadas, 7261,4 km S e 215 km W, onde ocorre a anomalia nos canais de eU e eTh. As pseudo-seções de resistividade aparente e cargabilidade tiveram a extensão de 1 km. Seus resultados são observados na Figura 5.

Entre as posições 250 m e 580 m foi identificada uma porção resistiva com cerca de 1000 Ohm.m, sendo esse valor indicativo de rochas ígneas sãs, pouco intemperizadas. No entanto, sua cargabilidade foi alta, mostrando heterogeneia lateral nesta área, sugerindo a presença de um corpo distinto da alcalina. Os sedimentos oriundos de argilominerais, resultado esperado em alteração de rochas alcalinas, apresentariam como resposta mais provável a baixa resistividade. Uma possível interpretação dos dados é a presença de rocha carbonatítica neste local.



**Figura 3a.** Distribuição da condutividade obtida através do EM34, com a bobina posicionada na horizontal. Os valores anômalos da ordem de 60 mS/m, podem indicar a presença de corpos metálicos mineralizados, ou bolsões enriquecidos em piroxenito, como consequência de processos de diferenciação magmática. Os pontos brancos correspondem aos pontos de medição com o EM34.



**Figura 3b.** Distribuição da condutividade obtida através do EM34, com a bobina posta na vertical. Os valores anômalos da ordem de 60 mS/m podem indicar a presença de corpos metálicos mineralizados, ou resultado da diferenciação magmática com bolsões enriquecidos em piroxenito. Os pontos brancos correspondem aos pontos de medição com o EM34.

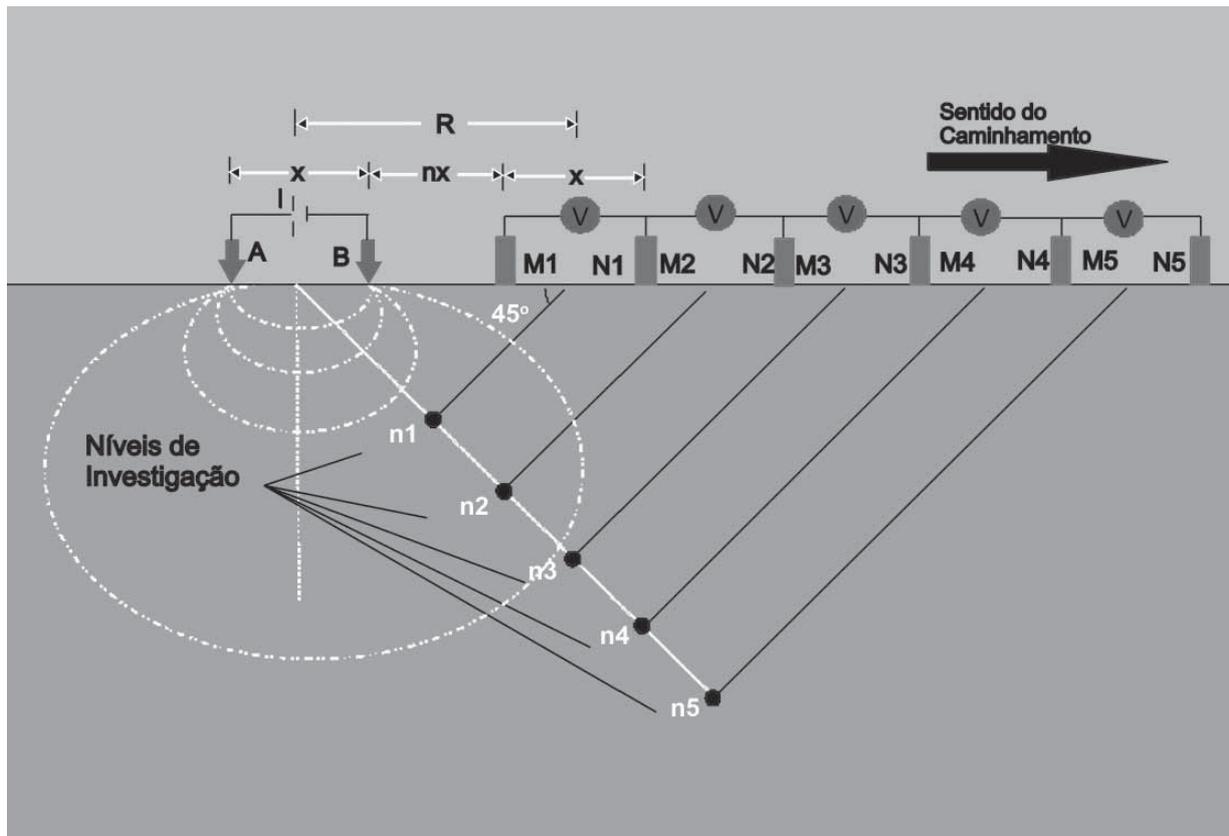


Figura 4. Geometria utilizada no método dipolo-dipolo, sendo a AB o dipolo injetor de corrente, e MN o dipolo de medida.

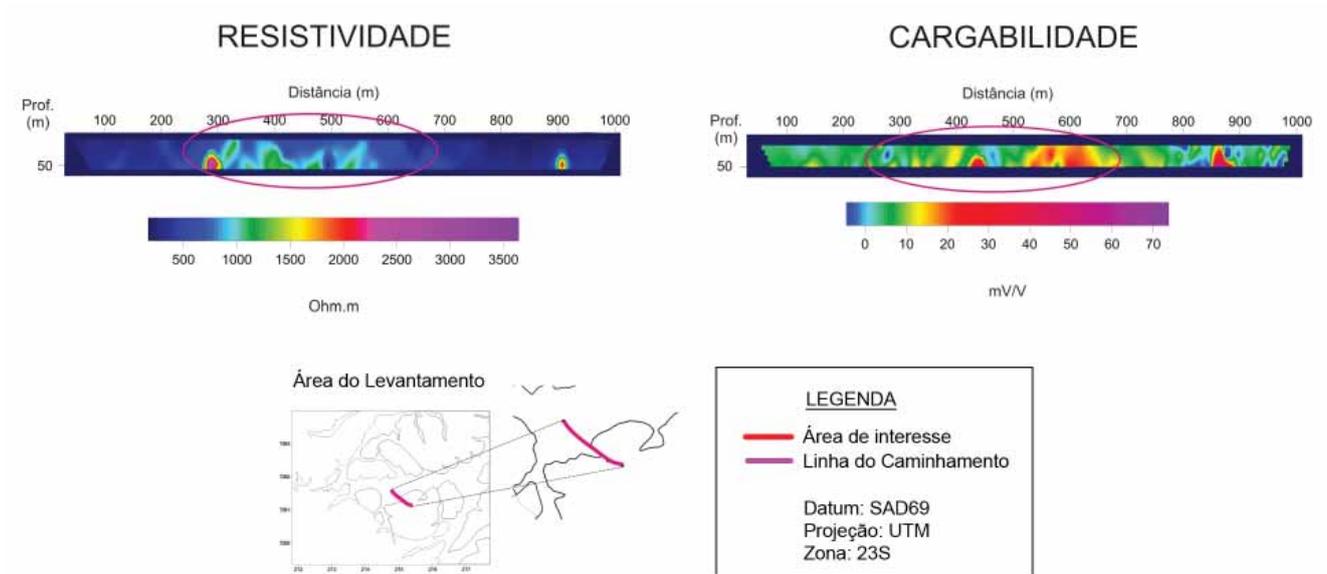


Figura 5. Pseudoseção dipolo-dipolo da resistividade e cargabilidade. A cargabilidade apresenta altos valores a 40 m de profundidade, podendo representar um possível corpo carbonatítico alterado.

Os carbonatitos são rochas ígneas com mais de 50% de minerais carbonáticos, sendo citados: calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{MgCO}_3$ ) e siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). O estágio inicial de alteração do carbonatito de Juquiá (nas proximidades de Pariqueira-Açu) é registrado em materiais com pequena expressão em volume e caracteriza-se por (Alcover Neto e Toledo, 1993):

1. dissolução parcial dos cristais dolomíticos ao longo das discontinuidades inter e intraminerais, visível macro e microscopicamente;
2. dissolução parcial dos planos de descontinuidade daqueles cristais por oxí-hidróxidos supérgenos de ferro e/ou manganês, iniciando a formação de pseudomorfoses por emparedamento;
3. conservação total dos cristais de apatita primária.

Assiste-se, nesta fase, a uma mobilização de íons  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , e  $\text{CO}_3^{-2}$  e a uma fixação de ferro e manganês, em parte alóctones, nos domínios dos cristais dolomíticos. (Alcover Neto e Toledo, 1993). Essa mobilização iônica e fixação de ferro e manganês nos neominerais poderiam ser os responsáveis pela alta cargabilidade observada no perfil geoeletrico.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A existência de uma baixa gravimétrica de cerca de 2 mGal, que permite o modelo de um corpo com densidade de  $2,8 \text{ g/cm}^3$  no local da anomalia radioativa (Rugenski, Mantovani, Shukowsky, 2001), pode corresponder a uma cobertura sedimentar somada a uma variação litológica da alcalina, segundo interpretações preliminares da gravimetria. No entanto, essa interpretação não possui respaldo quando somada às novas informações geofísicas.

A gamaespectrometria indicou medidas na cobertura sedimentar que são anômalas para sedimentos, subsidiando a existência de uma rocha radioativa abaixo do sedimento, indicando uma possível mobilidade iônica dos elementos radioativos da alcalina para o sedimento, e uma baixa blindagem aos raios gama, pela espessura sedimentar.

Essa anomalia identificada e ressaltada como a área de interesse, apresenta nas pseudo-seções alta resistividade e alta cargabilidade. Essas três informações somadas podem sugerir a presença de uma rocha carbonatítica no local. A alta cargabilidade pode ser resultado de um possível corpo magnético diferenciado, sugerindo a existência de uma distinta na alcalina, possivelmente um carbonatito.

Já o método eletromagnético em conjunto com o gamaespectrométrico se mostrou eficaz no mapeamento das variações litológicas da alcalina, sendo citados os tipos excessito, theralito, melatheralito, sienogabro e sienodiorito.

## CONCLUSÕES

A integração entre os métodos eletromagnético, eletroresistivo, de IP e gamaespectrométrico possibilitou o mapeamento das variações litológicas do corpo alcalino, podendo corresponder a rochas do tipo excessito, theralito, melatheralito, sienogabro e sienodiorito. Além disso, localizou um corpo distinto, com mineralogia diferenciada se comparada à alcalina de Pariqueira-Açu, que pode ser relacionada ao carbonatito.

A pesquisa fornece subsídios para locar a perfuração de um poço pioneiro para a verificação da existência de carbonatito, em correspondência à anomalia identificada como área de interesse.

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Eronaldo Bonfim, Vagner Ellis, Carlos Alberto Mendonça que contribuíram para o estudo. Aos revisores, anônimo e J. D. F. Gallas, pelas valiosas sugestões. Ao CNPq pelo fomento.

## REFERÊNCIAS

- ALCOVER NETO, A.; TOLEDO, M. C. M. Evolução Supérgena do Carbonatito de Juquiá. *Revista do Instituto de Geologia*, São Paulo, v. 14, n. 1, p. 31-43, 1993.
- ALGARTE, J. P. A influência dos arqueamentos cratônicos no condicionamento das alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972, Belém. *Anais...* Belém: SBG, 1972. v. 1, p. 65-69.
- ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B. de; Carneiro, C. D. R. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, v. 50, p. 77-111, 2000.
- BARRETO, P. M. C.; AUSRETLITZ, C.; MALHEIROS, T.; LOVBORG, L. *Radiative concrete sources at IRD/CNE, Brazil, for the calibration of uranium exploration and environmental fields instruments*. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD/DEX-3/CNEN, 1986, 66 p. (Relatório Inédito).
- BRUMATI, M. *Mineralogia aplicada ao beneficiamento das zonas de xenólitos, Mina de Cajati, SP*. 2008, 1 v. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- CAMPANHA, G. A.; SADOWSKI, G. R. Tectonics of the southern portion of Ribeira belt (Apliaí Domain). *Precambrian Research*, v. 98, p. 31-51, 1999.

FERREIRA, F. J.; MONMA R.; SILVA, R. B.; ALGARTE, J. P.; MARTINS, F. A. G.; RODRIGUES, E. P.; THEODOROVICZ, A.; TASSINARI, C. G. C.; COUTINHO, J. M. V. A alcalina de Pariquera-Açu. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA, 6., 1987, Rio Claro. *Anais...* Rio Claro: SBG/SP, 1987. v. 1, p. 159-164.

GOLDEN SOFTWARE, Surfer version 7.0., 1999. Disponível em: <<http://www.goldensoftware.com/products/surfer/surfer.shtml>>. Acesso em: 15 nov. 2010.

KOGAN, R. M.; NAZAROV, I. M.; FRIDMAN, S. H. D. *Gamma spectrometry of natural environments and formations: theory of the method applications to geology and geophysics*. Atomi Jerusalem, 1971. 337 p.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. *Geologia Geral*. Editora Nacional, São Paulo, 12ª Ed., 1995. 399 p.

MORBIDELLI, L.; GOMES, C. B.; BROTZU, P.; ACQUARICA, S. D.; GARBARINO, C. The Pariquera-Açu K-alkaline complex and southern Brazil lithospheric mantle source characteristics. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 18, p. 129-150, 2000.

OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J.; CARVALHO A.; FRIEDRICH G.; MARKER A.; KANIG, M. Lateritic evolution of the Jacupiranga Alkaline Complex. *Geochimica Brasiliensis*, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 119-126, 1988.

RUGENSKI, A.; MANTOVANI, M. S. M.; SHUKOWSKY, W. Modelo gravimétrico do complexo alcalino de Pariquera-Açu. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, v. 31, n. 3, p. 365-374, 2001.

SILVA, A. T. S. F.; ALGARTE, J. P. Contribuição à geologia da Sequência Turvo-Cajati entre o Rio Pardo e Pariquera-Açu, Estado de São Paulo. 1. Litologia e petrografia. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., 1981, Curitiba. *Anais...* Curitiba: SBG, 1981. v. 1, p. 109-120.

SILVA, A. T. S. F.; GODOY, A. M.; FRANCISCONI, O.; BATOLLA JR., F. *Projeto Integração e detalhe geológico no Vale do Ribeira*. São Paulo: DNPM/CPRM, 1981, v. 5, cap. 4. (Relatório final).

SØRENSEN, H. *The alkaline rocks*. London: John Wiley e Sons, 1974. 622 p.

WEAST, R. C.; MELVIN, J. A.; BEYER, W. H. *Handbook of Chemistry and Physics*. 67ª Ed. Boca Raton: Crc Press, 1987. p. F-303.