CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO COMPLEXO DE JUQUIÁ.

GABRIELA DE BRITTO SLAVEC¹, MARTA SILVIA MARIA MANTOVANI, WLADIMIR SHUKOWSKY

ABSTRACT *CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE JUQUIÁ COMPLEX* The Juquiá Alkaline Carbonatic Complex is a zoned circular intrusion of about 5 km in diameter with the greatest amount of phosphorus oxide among other studied alkaline complexes in Brazil. In order to estimate the volume of that Complex, a semi-detailed gravity survey was performed in correspondence to this structure, covering about 13 square kilometers. The data were modeled along cross-cutting profiles considering a 2.5 D geometry, in order to infer a 3D structure. The 3D geophysical model suggests volumes for pyroxenite of c.a. 48 km³ and for carbonatite of c.a. 5.5 km³.

Keywords: Geophysics, gravity, 2.5D and 3D geometry, alkaline complex, carbonatite.

RESUMO O Complexo Alcalino Carbonatítico de Juquiá constitui uma intrusão circular zonada com cerca de 5 km de diâmetro tendo o maior teor em óxido de fósforo dentre os vários complexos estudados no Brasil. Com a finalidade de dimensionar volumetricamente o Complexo, foi feito um levantamento gravimétrico de semidetado em correspondência a essa estrutura, cobrindo uma área de cerca de 13 km². Os dados foram modelados em perfis para corpos com geometria 2,5 D, de forma a se inferir uma estrutura tridimensional. Pelo modelo estima-se um volume de piroxenito da ordem de 48 km³ e de carbonatito da ordem de 5,5 km³.

Palavras-chaves: geofísica, gravimetria, modelagem 2,5D, complexo alcalino, carbonatito

INTRODUÇÃO O Complexo Alcalino de Juquiá localiza-se a SW da cidade de São Paulo, aproximadamente a 160 km pela Rodovia Régis Bittencourt (BR116 - Fig. 1). Apresenta-se a seguir um levantamento gravimétrico de semi-detado, como complementação aos estudos já existentes, visando definir a forma, posição e volume das principais unidades que compõem o Complexo Alcalino de Juquiá. A área de estudo abrange cerca de 1300 km² no entorno da intrusão.

As rochas alcalinas se caracterizam por conter pouca sílica e/ou alumínio comparado às altas concentrações de álcalis. Entretanto, nem todas as rochas classificadas como alcalinas apresentam estas propri-

idades, como no caso dos carbonatitos que embora sejam empobrecidos em sílica raramente são ricos em álcalis. Diante disso, sua classificação baseia-se na relação entre os conteúdos de sílica (SiO₂) e álcalis (Na₂O + K₂O). Apesar de constituírem menos de 1% do volume de todas as rochas ígneas do planeta, a grande diversidade mineralógica e a importância econômica das rochas alcalinas as situa entre os alvos de estudo prioritário. Sua importância econômica está associada às elevadas concentrações de elementos incompatíveis e de grande raio iônico, tais como o Tântalo, Nióbio, Titânio e dos Elementos de Terras Raras (ETR) bem como a sua associação com depósitos de apatita e de diamantes (Fitton & Upton 1987).

As rochas alcalinas ocorrem em todos os ambientes tectônicos continentais ou oceânicos, com exceção das cadeias médio-oceânicas. Embora nem sempre apresentem evidências da ocorrência de magmatismo, os rifts continentais constituem os ambientes tectônicos com maior abundância de alcalinas. É o caso dos complexos alcalinos em correspondência ao Arco de Ponta Grossa, no Vale do Ribeira, dentre os quais se inclui o Complexo Alcalino-Carbonatítico de Juquiá.

As rochas do Complexo foram associadas tectonicamente ao Arco de Ponta Grossa, estrutura que sofreu processos de estiramento desde o Cretáceo Inferior (Almeida 1971, 1983). O ambiente tensional é testemunhado pela presença de enxames de diques e fraturas ou lineamentos sub-paralelos ao eixo principal do arco (NW-SE). A ocorrência do Complexo de Juquiá foi relacionada ao lineamento Guapiara (Ferreira e Algarte 1979). Sua idade K-Ar variando entre 130 e 135 Ma o situa entre um dos mais antigos complexos alcalinos do Fanerozóico, e penecontemporâneo do vulcanismo basáltico do Paraná (Gomes et al. 1990, Beccaluva et al. 1992).

O complexo alcalino de Juquiá possui uma dimensão reduzida (~14 km²), é uma estrutura zonada encaixada no embasamento gnáissico precambriano e contém uma variedade litológica considerada das mais adequadas para fins de estudos petrológicos. Como outros maciços alcalinos brasileiros, Juquiá exibe profundo intemperismo, a presença de carbonatitos em superfície (Morro do Serrote) e uma quase ausência de afloramentos de rochas frescas (Born 1971, Beccaluva et al. 1992). Evidências de fraturamento e de fenitização externa foram descritas para quase todos os complexos alcalinos brasileiros, com auréolas de fenitização de até 2,5 km de largura.

GEOLOGIA DA ÁREA Na área do Baixo Vale do Ribeira localiza-se o Complexo Gnáissico-Migmatítico (Fig. 2). Esse complexo foi subdividido por Teixeira *et al.* (1987) em três zonas de predominância: (1) migmatitos de estruturas heterogêneas, (2) migmatitos de estruturas homogêneas e (3) migmatitos indiferenciados. O Complexo Alca-

Figura 1 - Localização e acesso à região do Complexo Alcalino de Juquiá. O retângulo demarca a área de estudo. A linha mais espessa representa a Estrada Federal BR116, as linhas pontilhadas representam os caminhos e trilhas, as linhas mais finas representam os rios, os losangos a localização das amostras coletadas para medidas de densidade e os triângulos a localização de Referências de Nível (RN) do IBGE.

1 - Bolsista de Iniciação Científica da FAPESP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Rua do Matão, 1226, São Paulo, CEP 05508-900 SP, Brasil. E-mails: gabriela@iag.usp.br, marta@iag.usp.br, wladimir@iag.usp.br

CONVENÇÕES ESTRATIGRÁFICAS.

CENOZÓICO

coberturas sedimentares cenozóicas.

MESOZÓICO

rochas intrusivas alcalinas.

PALEOZÓICO INFERIOR

Bacias Tardias "Pull-apart" Formação Camarinha (sedimentos metamorfizados e vulcânicos)

Complexo gnáissico-migmatítico e correlatos.

PROTEROZÓICO SUPERIOR

granitóides pós-tectônicos.

granitóides sin-tectônicos.

Cn - Complexo Cunhaporanga.

Tc - Complexo Três Corregos.

Ag - Complexo Agudos Grandes.

Formação Capiru.

Grupo Setuva (incluídas a Sequência Turvo-Cajati e Formação Embu)

PROTEROZÓICO MEDIO-INFERIOR

SUPER-GRUPO ACUNGUÍ.

Grupo Itaiacoca (seqüências vulcano-sedimentares)

Formação Água Clara.

GRUPO YOTUVERAVA.

Sub-grupo Lajeado (carbonatos clásticos terrígenos)

Sub-grupo Ribeira (seqüências pelíticas com intercalações de metabasitos)

Formação Iporanga.

Formação Perau.

ARQUEANO

Sn Complexo Costeiro Sn - Formação Serra Negra.

CONVENÇÕES ESTRUTURAIS.

Falhas e zonas de cisalhamento transcorrentes.

Falhas de empurrão.

MAPA GEOLÓGICO DA PORÇÃO SUDESTE DO CINTURÃO RIBEIRA.

- Unidades litoestratigráficas mais importantes da Faixa Apiaí
- Alcalinas identificadas: (1) Juquiá; (2) Jacupiranga; (3) Pariqueira Açu.
(Modificado de Campanha & Sadowsky, 1999).

Figura 2 - Mapa Geológico da região sudeste do Cinturão Ribeira. Observa-se em (1) a localização do Complexo Alcalino de Juquiá (modificado de Campanha e Sadowsky 1999).

lino de Juquiá intrudiu essa estrutura de forma que quase todo seu perímetro superficial se encontra em contato com os migmatitos de estruturas heterogêneas. A porção noroeste encontra-se em contato com migmatitos de estruturas homogêneas, e ao sul foi observada a presença de migmatitos indiferenciados (Fig. 3). Teixeira *et al.* (1987) atribuiu a migmatização observada na área próxima ao Complexo Alcalino a um evento metamórfico de alto grau, de fácies anfibolito, datado do Proterozóico Inferior.

Na região de Juquiá, os migmatitos de estruturas heterogêneas estão associados aos metassedimentos da Sequência Cachoeira, em sua maioria constituídos por rochas de estrutura bandada e eventualmente dobrada. O paleossoma tem composição predominantemente granodiorítica, embora sejam observados também núcleos gnáissicos que constituem vestígios de migmatização mais antiga. Os neossomas são essencialmente graníticos. Os migmatitos de estruturas homogêneas

as apresentam um maior volume de neossoma, predominantemente granítico, relativamente ao paleossoma de composição granodiorítico-tonalítica. Finalmente, os migmatitos indiferenciados agrupam rochas de constituição diferente das acima descritas e cujo estado avançado de alteração não permitiu classificá-las nos dois grupos precedentes.

O Complexo Alcalino Carbonatítico de Juquiá é uma intrusão circular zonada com cerca de 5 km de diâmetro. Na região de cerca 2,5 km², correspondente ao Morro do Serrote, ocorre um carbonatito, classificado por Born (1971) em "interno" (bandado de composição ankerítica e dolomítica, pobre em apatita) e "externo" (de apatita-beforsito, com altos teores de ferro e manganês). Ocorre na forma de um corpo contínuo, contrariamente a outros complexos em forma de diques e veios restritos. A associação de apatita ao carbonatito favoreceu o desenvolvimento de um perfil de alteração extremamente rico em P₂O₅ constituindo a concentração residual de apatita com maior teor

Figura 3 - Detalhe da rocha na área do Complexo Alcalino de Juquiá (modificado de Born 1971 e Beccaluva et al. 1992).

em óxido de fósforo no Brasil (Alcover Neto & Toledo 1993).

O Complexo tem estrutura anular assimétrica centrada no carbonatito do Morro do Serrote, sendo o mergulho dos contatos entre o carbonatito e o anel de ijolitos aproximadamente vertical (Fig. 3). O setor setentrional é dominado por olivina-clinopiroxenitos e lentes de olivina-gabro alcalino na porção mais ao norte dos afloramentos. Nefelina-sienitos afloram no corpo isolado do Morro da Casa de Pedra sendo que em sua porção oriental prevalecem aqueles de maior granulação e mais ácidos. Essas rochas afloram também na porção sudoeste do complexo. Essexitos e sienodioritos, embora raros, são encontrados respectivamente como inclusões e como rochas cumuláticas na extrema borda meridional da intrusão sienítica principal. Diques de basanita a fonotefrito e fonolito, com largura de poucos

centímetros até 2 m, afloram em várias localidades e cortam principalmente os piroxenitos e nefelinas-sienitos (Born 1971, Beccaluva et al. 1992).

A fenitização do embasamento é evidente, principalmente ao redor das porções a noroeste e ao sul do complexo, onde se desenvolveram feldspatos alcalinos, biotitas e raros anfibólios sódicos (Born 1971, Teixeira et al. 1987, Beccaluva et al. 1992).

A interpretação geoquímica do Complexo Alcalino de Juquiá atribui seu espectro mineralógico a processos de diferenciação fracionada combinados com a imiscibilidade de líquidos de um único magma fonte circunscrito a um sistema fechado de baixa pressão, que pode ser representado por uma câmara magmática simples e rasa (Beccaluva et al. 1992).

Figura 4 - Anomalia magnética de intensidade total em correspondência ao Complexo Alcalino de Juquiá (área cinza) e às linhas de vôo do levantamento aéreo. Observa-se uma anomalia de maior extensão e amplitude (A), associada aos piroxenitos, e uma anomalia de menor expressão (B), associada aos carbonatitos. A polaridade invertida da anomalia (A) sugere uma significativa magnetização remanescente. A polaridade normal da anomalia (B) é atribuída ao contraste de magnetização do carbonatito, essencialmente não magnética intrudido em piroxenitos intensamente magnetizados (Mantovani et al. 1999).

LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS Dados magnéticos e radiométricos

A área em estudo foi coberta por levantamentos magnéticos e gama-espectrométricos aéreos e terrestres. Os levantamentos terrestres (Born 1971) possuem um número reduzido de medidas e grande espaçamento. As medidas de magnetometria não foram corrigidas da variação diurna, e os dados levantados permitiram apenas estabelecer uma correlação aproximada com a rocha existente. A cintilometria, por sua vez, indicou apenas uma anomalia nas proximidades do carbonatito. O perfil NW-SE que cortou o Morro do Serrote apresentou valores de 1,5 a 2 vezes superiores a radiação de fundo na parte externa à estrutura anular, sendo os valores mais elevados observados no flanco sudeste. Já na parte interna à estrutura, o contraste acentuou-se de 5 a 10 vezes, refletindo diferenças litológicas entre as duas partes do morro.

O levantamento aéreo que abrange o Complexo Alcalino de Juquiá corresponde à área 3 do projeto aerogeofísico São Paulo-Rio de Janeiro. A área foi sobrevoada entre 1978 e 1979 pela ENCAL sob contrato da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM 1995). As linhas de vôo, com direção N-S e espaçamento de 1 km, registraram medidas do campo magnético total, e contagem de emissões gama em quatro canais simultâneos (contagem total, Tório, Urânio e Potássio). As linhas de controle (E-W) cruzaram as linhas de vôo a intervalos de 10 km. Todas as medidas foram reduzidas à altura nominal de vôo (150m).

O registro magnético foi corrigido da variação diurna, tendo-se também procedido ao nivelamento das linhas de vôo e à remoção do campo geomagnético de referência (IGRF) calculado para a época do levantamento. Os dados radiométricos foram corrigidos da radiação de fundo (BKG) e do espalhamento Compton. As medidas magnéticas foram efetuadas com um magnetômetro de precessão de prótons, e aquelas radiométricas, registradas a cada segundo, utilizaram detectores de NaI (TI) que, no entanto, não foram calibrados de maneira que os dados radiométricos são fornecidos em unidades de contagens por segundo e não de tores (CPRM 1988, Anjos & Mourão 1988).

A intensa anomalia magnética de Juquiá, centrada em 24° 25' S e 47° 42' W (Fig. 4), apresenta uma polaridade invertida relativamente

Figura 5 - Anomalia gama-espectrométrica interpretada como o Complexo Alcalino de Juquiá. (a) observa-se um máximo de contagem total em correspondência ao Morro do Serrote (carbonatito). (b) a razão Th/U discrimina três unidades a leste do carbonatito, ricas em Th e pobres em U.

àquela esperada para um corpo magnetizado por indução, e circunscreve outra anomalia menos intensa, de polaridade normal. A anomalia mais intensa corresponde aos piroxenitos e aquela circunscrita, ao carbonatito (Mantovani et al. 1999).

A distribuição da contagem total da radiação gama bem como aquela registrada nos canais do Th e U evidencia uma anomalia positiva onde aflora o carbonatito (Fig. 5a), e a razão Th/U (Fig. 5b) discrimina três unidades adicionais a leste do carbonatito e próximas da superfície, enriquecidas em tório e empobrecidas em urânio (Mantovani et al. 1999).

Dados gravimétricos e altimétricos O levantamento gravimétrico foi realizado pelos autores e acompanhado de medidas altimétricas. As medidas da aceleração da gravidade utilizaram um

Tabela 1 - Densidades medidas para amostras coletadas na área de estudo, com diferentes rochas. Os valores determinados foram considerados para fins de modelagem e interpretação. Algumas amostras (*) foram rejeitadas em vista do grau de alteração.

Amostra	Localização Long./Lat. (UTM)	Densidade (g/cm ³)	Litologia
GS99-01	226,87/7202,59	1,74	quartzito
GS99-02	228,45/7206,72	2,70	gnaisse
GS99-03	229,52/7206,72	2,64	quartzito
GS99-04		2,77	plagioclásio
GS99-05	225,99/7296,81	2,59	solo alterado
GS99-06	225,67/7295,44	2,85	cromita, psilomilana, criptomilana ou wolframita
GS99-07	226,18/7293,93	2,85	sienito
GS99-09	220,72/7200,05	2,64	feldspatito
GS99-18		2,87	zona de alteração hidrotermal

Figura 6 - Anomalia gravimétrica de ar-livre na área de estudo. As cruzes marcam a localização das estações gravimétricas implantadas para fins da pesquisa em análise.

gravímetro LaCoste & Romberg modelo G, com realimentação eletrostática analógica, e foram referidas à rede gravimétrica fundamental através da estação Ribeira-B. Cada medida foi corrigida dos efeitos de maré terrestre calculada através do modelo de Longman (1959). O instrumento utilizado permite obter leituras com precisão de 0,05 mGal. A distância relativa entre as estações variou de 500 a 1000 m na porção central do Complexo até cerca de 3000 m, próximo e além de sua borda. Ao todo foram implantadas 291 novas estações e, considerando as 75 estações já existentes contou-se com um total de 366 estações gravimétricas na área de interesse (Fig. 6).

As medidas de altimetria utilizaram o método de barometria controlada através do registro contínuo em uma base fixa, centrada na área do levantamento (Fazenda Morro do Serrote). Seja na base fixa como na medida itinerante foi utilizado um conjunto de quatro barômetros (dois analógicos "Thommen" e dois digitais "Air-DB Intellisensor"), cujas leituras foram corrigidas pela umidade e temperatura através de um psicrômetro de aspiração ("Yope"). Todas as medidas foram referidas às referências de nível de Juquiá (RN-2120V) e de Registro (RN-2122J) da Rede de Nivelamento do IBGE. O erro estimado para essa metodologia, da ordem de 1,5 m no valor da altitude, corresponde a cerca de 0,3 mGal quando propagado para o valor da aceleração da gravidade g medida.

O posicionamento horizontal das estações foi efetuado por GPS com receptor de código CA, o qual fornece uma incerteza de 50 m nas

Figura 7 - Anomalia Bouguer (linhas cheias) calculada para a mesma área da Figura 6. As linhas tracejadas correspondem à anomalia regional, calculada por ajuste de mínimos quadrados de um polinômio de grau 2. A diferença entre os dois campos (observado e regional) define a anomalia residual que é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Detalhe da Anomalia Bouguer Residual sobre o Complexo Alcalino de Juquiá e localização dos perfis utilizados na modelagem. A Anomalia Bouguer residual resulta da diferença entre o campo gravimétrico anômalo observado e o campo regional representado por um polinômio de grau 2.

coordenadas planimétricas (inferior a 0,1 mGal para essa latitude, quando propagado para o valor da aceleração de gravidade). O transporte da base a partir do posicionamento dos pontos da RN utilizou um receptor GPS diferencial "Trimble" (EP-USP, Blitzkow 1996). Foram coletadas amostras representativas de várias rochas aflorantes, frescas ou pouco alteradas, para medir sua densidade. A distribuição das amostras coletadas é mostrada na Fig. 1, e os valores obtidos

Figura 9 - Sinal analítico (a) da Anomalia Bouguer; (b) da Anomalia Magnética. As linhas verticais correspondem às linhas de voo.

encontram-se listados na Tabela 1.

PROCESSAMENTO DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS

As medidas gravimétricas foram referidas à rede gravimétrica fundamental e as medidas altimétricas referidas à rede de nivelamento do IBGE. As correções rotineiras (a) devido ao movimento de rotação da Terra em torno de seu eixo (gravidade teórica; g_p), (b) à sua posição relativamente à superfície do Geóide (correção de Faye ou de ar-livre; $g_h = 0,3086h$) e às massas interpostas entre o ponto de medida e a superfície do Geóide (correção Bouguer; $g_B = 2\rho Grh$) foram aplicadas a cada estação de medida. A topografia, relativamente suave na área, permitiu a omissão da correção de terreno, uma vez que a estimativa de sua contribuição nos trechos mais acidentados se apresentou da ordem de grande-

za do erro experimental agregado à medida da aceleração da gravidade.

Do valor observado (g_{obs}) foi subtraído o valor da gravidade teórica definido pela Fórmula Internacional da Gravidade de 1967 [$g_t = 978,03090 (1 + 0,005302 \sin^2 \phi - 0,00005828 \sin^2 2\phi)$], somado o valor da correção de ar-livre, obtendo-se a anomalia de Faye (Fig. 6) e subtraído o valor da correção Bouguer, obtendo-se a anomalia Bouguer de campo total (Fig. 7).

O campo Regional foi obtido ajustando-se o polinômio de grau 2, uma vez que este apresentou o menor resíduo nas áreas afastadas do Complexo Alcalino (Fig. 7, linhas tracejadas). A anomalia Bouguer residual, devida à presença da intrusão de Juquiá, foi obtida subtraindo-se o campo regional da anomalia Bouguer observada.

A anomalia gravimétrica residual sobre o Complexo é observada em detalhe na Fig. 8. Nota-se um acentuado gradiente circular na parte setentrional da anomalia, um pouco distorcido em sua porção SW. Quanto maior a amplitude do gradiente, maior o contraste de densidade e/ou a extensão da intrusão em subsuperfície. A presença do gradiente localiza o contato entre os dois tipos de rocha, piroxenito e migmatito, que diferem quanto à densidade. A anomalia decresce radialmente até atingir o nível do campo regional a uma distância de cerca 4 km do afloramento das rochas do complexo alcalino, sugerindo que a intrusão alcance grande profundidade.

Ainda na figura 8, observa-se um alongamento do máximo da anomalia em sentido sul, sobre o afloramento de piroxenitos. A maior amplitude da anomalia levemente deslocada do centro para o norte sugere o sítio de maior profundidade da raiz. A distorção para SW da anomalia coincide com o afloramento de sienitos e fenitos, cujas densidades são inferiores àquela do piroxenito encaixante. A amplitude da anomalia no carbonatito decresce de vários miliGals, configurando uma rocha 3D contrastante com o piroxenito.

Uma melhor delimitação superficial dos dois corpos em estudo pode ser visualizada através do sinal analítico da Anomalia Bouguer (Fig. 9a). Observa-se a excelente coincidência do sinal analítico em correspondência à delimitação geológica do carbonatito. Nota-se também a concordância relativa aos limites do piroxenito. Já o sinal analítico da Anomalia Magnética não apresenta o mesmo detalhe, tendo em vista a distância entre as linhas de voo (1 km) e a altura de voo (150 m), características de um levantamento de reconhecimento e não de detalhe (Fig. 9b).

Modelagem gravimétrica

A modelagem dos dados gravimétricos foi feita com quatro perfis perpendiculares às principais feições gravimétricas do complexo alcalino, considerando uma geometria 2,5D através do programa GRAVMAG (Pedley *et al.* 1997). Um critério adicional para a seleção dos perfis foi a densidade de dados gravimétricos medidos sobre ou nas proximidades dos mesmos. Na Fig. 10 apresentam-se os traçados dos perfis utilizados na modelagem. Note-se o cruzamento dos perfis AA' e DD' em correspondência ao carbonatito, AA' e CC' no máximo de amplitude da anomalia, AA' e BB' com o gradiente mais suave da anomalia no piroxenito e AA' e DD' na região do gradiente mais acentuado ao norte da anomalia. A comparação entre os perfis e o ajuste nos cruzamentos permitem vincular melhor os parâmetros de forma a obter uma visualização tridimensional do Complexo.

Na modelagem dos perfis apresenta-se a curva referente à anomalia gravimétrica observada (linha cheia), àquela calculada em relação ao modelo representado abaixo na forma de secção (linha tracejada) e o resíduo entre as duas curvas (linha pontilhada). Apresenta-se ainda a posição dos demais perfis relativamente ao corpo modelado, para fins de verificação da coincidência de profundidade da base do corpo no ponto de cruzamento (Fig. 10 a-d).

As rochas modeladas se limitaram às que afloram na região da anomalia gravimétrica residual. Os valores de densidade utilizados para cada rocha foram os mesmos em todos os perfis: piroxenito ($3,25 \text{ g.cm}^{-3}$), sienito ($2,93 \text{ g.cm}^{-3}$), migmatito ($2,80 \text{ g.cm}^{-3}$) e carbonatito ($2,75 \text{ g.cm}^{-3}$).

O perfil AA' atravessa o carbonatito e o piroxenito, passando próximo ao centro do máximo de amplitude da anomalia gravimétrica. Nesse ponto, onde a profundidade máxima do piroxenito corresponde a 6.000 m, ocorre o cruzamento com o perfil CC'. No cruzamento com

Figura 10 - Modelagem gravimétrica 2,5 D ao longo dos perfis mostrados na Figura 8. (a) O perfil AA' atravessa o carbonatito e o piroxenito, passando próximo ao centro do máximo de amplitude da anomalia gravimétrica; (b) o perfil BB' atravessa o piroxenito, o sienito e intercepta o carbonatito já em subsuperfície; (c) o perfil CC' atravessa o ponto de máxima amplitude da anomalia; (d) o perfil DD' corta o carbonatito em superfície. Observa-se a boa concordância dos modelos em correspondência aos pontos de cruzamento dos diferentes perfis.

o perfil BB' a profundidade resulta 4.600 m e 3.700 m em correspondência ao perfil DD'. Ao longo desse perfil, o modelo do carbonatito apresenta seção aproximadamente circular, tendo máxima profundidade de 1.600 m (Fig. 10-a).

O perfil BB' corta o piroxenito, o sienito e atravessa o carbonatito já em subsuperfície (Fig. 10-b). A máxima profundidade do piroxenito ao longo desse perfil é de 4.700 m, um pouco maior daquela modelada no cruzamento com o perfil AA' (4.600m) e coincidente com o valor da Fig. 10 (a). O fenito alcança profundidade máxima de 1.100 m e o carbonatito tem profundidade máxima de 1.800 m com o topo a 300 m da superfície. O cruzamento com o perfil DD' ocorre a uma profundidade do piroxenito entre 1.500 e 2.000 m.

A máxima profundidade do piroxenito (6.300 m) é modelada ao longo do perfil CC', no ponto de máxima amplitude da anomalia (Fig. 10-c). Em correspondência a 6.000 m de profundidade ocorre o cruzamento com AA', em acordo com o modelo da Fig. 10(a). Aqui, o fenito alcança profundidade de 1.400 m embora ocupe uma área inferior àquela no perfil BB'.

Finalmente, o perfil DD' corta o carbonatito em superfície, e seu modelo apresenta forma aproximadamente circular semelhante àquela do perfil AA', com profundidade máxima de 1.600 m no cruzamento e coincidente com o valor obtido na modelagem ao longo desse perfil. Em correspondência do cruzamento com BB' a profundidade do piroxenito (1.500 e 2.000 m) está de acordo com aquela modelada em

10(b).

Levando em consideração a geometria 2,5D nos vários planos verticais que cruzam a anomalia, estimou-se o volume do Complexo de Juquiá em cerca de 53,5 km³. Deste, cerca de 10% corresponde ao volume do carbonatito; o volume dos fenitos é inexpressivo relativamente ao do piroxenito estimado em 48 km³.

Apesar do método admitir múltiplas soluções, os vínculos geológicos (contatos, falhas, etc.), a localização das anomalias radiométricas e o contraste de densidade conhecido para as rochas em estudo, limitam o número de soluções e portanto o erro associado. Estima-se que esse seja da ordem de 15%.

Metodologias geofísicas adicionais, como a geolétrica, a sísmica e sondagens, permitirão estabelecer intervalos de variação menores para esses vínculos, e portanto refinar o modelo obtido.

A localização relativa das duas anomalias magnéticas contribui na limitação desses vínculos, e a polaridade observada estabelece limites para a idade de colocação do corpo (>120 Ma ou < 80 Ma). As datações K-Ar existentes sugerem que o primeiro valor seja o mais provável, mas somente através de datações Ar-Ar será possível estabelecer com precisão a idade do Complexo.

CONCLUSÕES A partir da modelagem apresentada estimou-se o volume do carbonatito em 5,5 km³, atingindo profundidade de até 1,7 km. A raiz do piroxenito, entretanto, pode atingir uma profundidade

de de até 6 km, sendo seu volume estimado de 48 km³. O corpo fenítico pouco interfere no modelo em vista de seu pequeno contraste de densidade com a encaixante e sua inexpressiva espessura.

O modelo proposto sugere uma geometria 3D da intrusão em sub-superfície e, embora possam ser introduzidas variações laterais e de profundidade na geometria do corpo, a tendência geral deverá permanecer muito próxima daquela proposta, em vista da excelente concordância alcançada nos vários cruzamentos entre os perfis. A análise

qualitativa dos dados aéreos (magnéticos e gama espectrométricos) corrobora o modelo apresentado.

Agradecimentos A E. M. Leite e André Rugenski (IAG/USP), às sugestões e críticas dos dois revisores anônimos da RBG, à Escola Politécnica da USP pela cedência do receptor GPS (geodésico), à CPRM pelos dados aeromagnéticos e à FAPESP (Proc. 98/05501-6) e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- Alcover Neto A. & Toledo M.C.M. 1993. Evolução Supérgena do Carbonatito de Juquiá, SP. Ver. IG, São Paulo, 14:31-43.
- Almeida F.F.M. 1971. Condicionamento Tectônico do Magmatismo Alcalino do Sul do Brasil e do Paraguai Oriental. Anais Acad. brasil. Ciênc., 43:835-836.
- Almeida F.F.M. 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma sul-americana. Rev. Brasil. Geoc., 13:139-158.
- Anjos I.L.S. & Mourão L.M.F. 1988. Projeto São Paulo – Rio de Janeiro – Relatório Final – Processamento dos dados. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 29 pp.
- Beccaluva L., Barbieri M., Born H., Brotzu P., Coltorti M., Conte A., Garbarino C., Gomes C.B., Macciotta G., Morbidelli L., Ruberti E., Siena F., Traversa G. 1992. Fractional Crystallization and Liquid Immiscibility Processes in the Alkaline Carbonatite Complex of Juquiá (São Paulo, Brazil). J. Petrol., 33:1371-1404.
- Blitzkow D. 1996. O Problema de valor de contorno da geodésia: resultados práticos para a América do Sul. Tese de Livre Docência, EP-USP, 83 pp., inédita.
- Born H. 1971. O complexo alcalino de Juquiá. Tese de doutorado, Inst. Geociênc. USP, 176 pp., inédita.
- Campanha G. A. da C. & Sadowsky G. R. 1999. Tectonics of the Southern portion of the Ribeira belt (Apiaí domain). Elsevier Science B. V. Pré Cambrian Research, 98:31-51.
- CPRM. 1995. Catálogo geral de produtos e serviços. Geologia. Levantamentos aerogeofísicos. Base de dados AERO. 2ª Ed. – Rio de Janeiro: Diretoria de Geologia e Recursos Hídricos.
- Ferreira F.J.F. & Algarte J.P. 1979. O comportamento aeromagnético-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. Atas, II Simpósio Regional de Geologia, Rio Claro 2:195-208.
- Fitton J.G. & Upton B.G.J. 1987. Eds. Introduction. In: *Alkaline Igneous Rocks*. Geological Society Special Publication n°30. The Geological Society. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK. 568 pp.
- Gomes C.B., Ruberti E., Morbidelli L. 1990. Carbonatite complexes from Brazil: A review. J. South Amer. Earth Sci., 3:51-63.
- Longman I.M. 1959. Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun. J. Geophys. Res., 64:2351-2355.
- Mantovani M.S.M., Shukowsky W., Slavec G.B. 1999. O Complexo Alcalino de Juquiá, SP: integração de dados geofísicos. Bol. do 5º Simp. sobre o Cretáceo do Brasil, 219-223, UNESP, Campus do Rio Claro, ISSN: 1516-8239.
- Pedley R.C., Busby J.P., Dabek Z.K. 1997. GRAVMAG User Manual – Interactive 2.5D gravity & magnetic modelling. Technical Report WK/93/26/R. British Geological Survey 73 pp.
- Pedley R.O., Busby J.P., Dabek Z.K. 1993. Interactive 2.5 D Gravity & Magnetic modelling – GRAVMAG user manual, Regional Geophysical Series, British Geological Survey, Technical Report WK/93/26/R, (NERC Copyright), 73p.
- Teixeira A.L., Dantas A.S.L., Gimenes Fº J.L.A.L., Nagata N., Fernandes L.A., Albuquerque Fº J.L. 1987. Geologia da Folha de Juquiá, Baixo Vale do Ribeira, SP. São Paulo (IPT, Relatório Técnico 25.371).

Manuscrito A-1189

Recebido em 10 de novembro de 2000

Revisão dos autores em 25 de maio de 2001

Revisão aceita em 30 de maio de 2001