

MODELO GRAVIMÉTRICO DO COMPLEXO ALCALINO DE PARIQUERA-AÇU (SP)

ANDRÉ RUGENSKI¹, MARTA SILVIA MARIA MANTOVANI² & WLADIMIR SHUKOWSKY²

ABSTRACT *GRAVIMETRIC MODEL OF THE PARIQUERA-AÇU ALCALINE COMPLEX (SP)* A gravity survey was carried out in order to model the 3D geometry and physical characteristics of the Pariquera-Açu alkaline complex emplaced in the Ribeira Valley (SE - Brazil). As a result, gravity pattern, density distribution, 3D geometry and consequent volume and mass of the alkaline complex, were determined. The results have allowed the definition of the present geological interpretation and, in particular, to establish the tectonic nature of the alkaline complex emplacement. To solve the problem, geophysical and numerical methods for determining the Bouguer residual field were used. Mathematical tools as Butterworth filter, least squares and robust polynomial were selected, taking into account the available data, including those from magnetic and radiometric surveys. Qualitative and quantitative analyses were used to establish the polynomial degree for which the gravity regional field would be better represented. The best fit worth a 6th degree robust polynomial, being the difference with the observed gravity field always lower than a mGal. Comparing three models (2.5 D, prismatic 3 D, and irregular 3 D) using the measured geophysical parameters and the boundary conditions inferred from geological information, the 3D irregular shape gravity model is preferred. The best fit 3D model gives as result an average density of 3,14 g/cm³ for the alkaline complex, its density contrast to the wall rock being 0,46 g/cm³, its maximum depth 8,93 km, its surface area 6 km² and a volume of 8,26 km³. The modeled geometry results in a total mass for the alkaline complex of 0,38 x 10¹⁰t.

Keywords: gravity, alkaline complexes, geophysics, Pariquera-Açu

RESUMO Apresenta-se um levantamento gravimétrico de semi-detalle do complexo alcalino de Pariquera-Açu localizado no Vale do Ribeira, São Paulo. Por meio de dados levantados, foram determinados parâmetros físicos e geométricos tais como campo gravitacional, densidade volumétrica e superficial, peso, esforço uniaxial (na base do complexo alcalino), limites espaciais e volume do complexo alcalino. Os resultados obtidos permitem refinar as interpretações geológicas existentes, bem como inferir o mecanismo de estabelecimento desse complexo na encaixante. Na abordagem do problema foram utilizados métodos geofísicos e programas numéricos para determinar o campo gravimétrico residual. Instrumentos matemáticos, tais como a filtragem no domínio da frequência (filtro Butterworth), ajuste polinomial por mínimos quadrados e polinômio robusto foram utilizados para determinar o campo gravimétrico regional. Foram também levadas em consideração informações provenientes do levantamento aéreo que recobre a área e compreende medidas magnéticas e gamaespectrométricas. O melhor ajuste polinomial para a representação do campo gravimétrico regional foi obtido através de um polinômio robusto de grau 6, para o qual a discrepância com o campo observado é inferior a um mGal. Comparando os três modelos (2.5 D, 3 D prismático e 3D irregular) e aplicando os parâmetros geofísicos calculados e as condições de contorno inferidas através das informações geológicas, optou-se pelo modelo gravimétrico 3 D de formato irregular. Esse modelo forneceu como densidade do corpo alcalino o valor de 3,14 g/cm³ tendo como contraste, relativo à rocha encaixante, 0,46 g/cm³; sua geometria 3D apresenta uma profundidade máxima de 8,93 km; área superficial de 6 km²; volume de 8,26 km³, resultando numa massa de 0,38 x 10¹⁰t.

Palavras-chaves: gravimetria, complexos alcalinos, geofísica, Pariquera-Açu.

INTRODUÇÃO O termo rocha alcalina é recomendado pelo *American Geological Institute* para designar rochas que contém grande concentração de álcalis, suficiente para formar feldspatos em face de sua disponibilidade de sílica (Sfrensen 1974). O termo rocha alcalina já foi também usado para designar as rochas alcalinas do Atlântico ou séries alcalinas (fácies, grupo, subgrupo), rochas ígneas com feldspatos que apresentam concentrações de álcalis acima da média, rochas ígneas com feldspatóides (nefelina, sodalita, leucita, etc.), rochas ígneas com índice de cálcio < 51, rochas ígneas com feldspatóides *d* ou Na-piroxênios e/ou Na-anfíbios. (Sfrensen 1974).

O Vale do Ribeira é sítio de minerais economicamente importantes, sendo que uma relevante porcentagem está associada às rochas alcalinas. Nestas são encontradas, por exemplo, Terras Raras, fosfatos, carbonatos, apatita, barita e magnetita. Quanto à herança tectônica, são indicativas de adelgaçamento litosférico. Esse processo litosférico é expresso por uma variedade de manifestações tectônicas* e epirogênicas, tais como domeamento devido a presença de pontos quentes (Crough 1983), rifting resultante de esforços de tração (Morgan 1983), e soerguimento de platôs seguido de processos erosivos. O soerguimento de um platô pode ser induzido por fenômeno de compensação isostática, ou por arqueamento em ambiente compressivo.

Por sua localização privilegiada, próxima ao litoral e nas vizinhanças do maior pólo industrial brasileiro, o Vale do Ribeira emerge entre as áreas prioritárias para fins de estudos geofísicos sistemáticos voltados à identificação de novas áreas mineralizadas com elevado potencial econômico. Dentre os maciços alcalinos explorados economicamente nessa região, destacam-se Juquiá e Jacupiranga. O complexo alcalino de Pariquera-Açu localizado respectivamente a SE e a E des-

sés maciços, e cujo potencial econômico ainda não foi avaliado, é alvo do presente estudo.

Inicialmente identificado no registro magnético da "área 3" do aerolevanteamento SP-RJ, entre os paralelos 24,6° - 24,8° S e meridianos 47,8° - 48,0° W (CPRM 1995), o complexo alcalino de Pariquera-Açu apresenta uma intensa anomalia com amplitude máxima de 2800 nT, para uma altura de voo uniforme, reduzida a 150 m acima do nível do solo (Fig. 1). Atribuída por Ferreira & Algarte (1979) a uma manifestação alcalina, sua natureza foi confirmada por Silva & Algarte (1981) ao identificarem sienitos no local, indicadores de estágio avançado de erosão.

Estudos posteriores (Ferreira *et al.* 1987), realizados através do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) empregando aerogamaespectrometria e magnetometria aérea e terrestre, ao sustentarem a hipótese apresentada anteriormente mantiveram seu caráter qualitativo devido à limitação desses métodos quando não complementados por levantamentos geofísicos (gravimétricos ou sísmicos).

Com o objetivo de contribuir para uma estimativa de seu potencial econômico, apresenta-se aqui um levantamento gravimétrico de semi-detalle, para determinar a geometria e as dimensões do preconizado complexo alcalino, seus parâmetros físicos (tais como densidade superficial e volumétrica, massa, esforço uniaxial, e efeito gravitacional) e verificar a existência ou ausência de associação entre mecanismo de seu alojamento e a tectônica da área.

GEOLOGIA DA ÁREA O complexo alcalino de Pariquera-Açu situa-se num variado cenário geológico do Vale do Ribeira, onde se insere o Rifte Continental do Sudeste, em face de sua riqueza em estru-

1 - Bolsista CAPES, Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), Rua do Matão, 1226, CEP 05508-900 São Paulo, SP, Brasil, e-mail: andrerug@iag.usp.br

2 - Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), Rua do Matão, 1226, CEP 05508-900 São Paulo, SP, Brasil. E-mails: marta@iag.usp.br; wladimir@iag.usp.br.

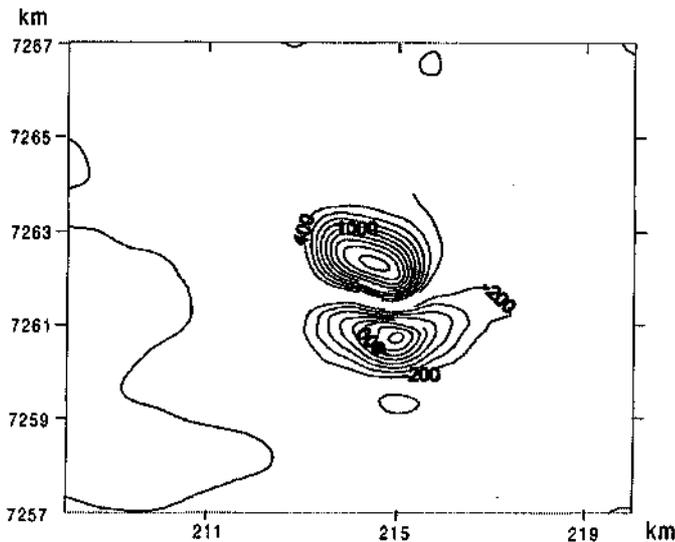
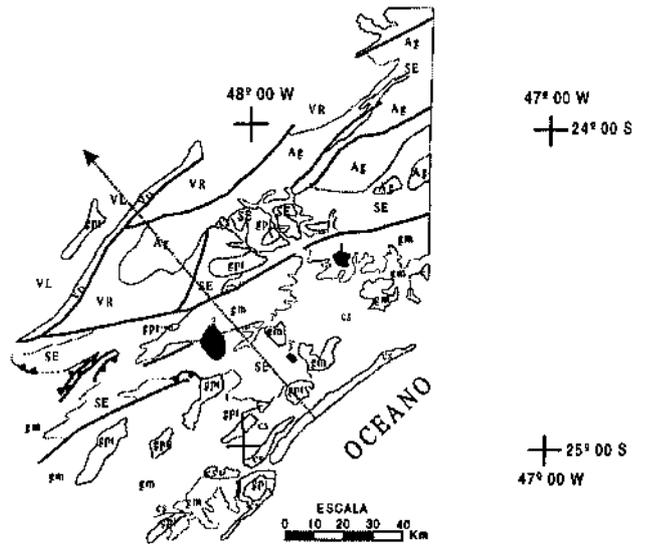


Figura 1 - Anomalia magnética em correspondência ao complexo alcalino de Pariquera-Açu. (dados aéreos cedidos pela CPRM).

turas tectônicas e diversificação petrográfica. O embasamento dessa região é constituído principalmente por rochas metamórficas, migmatíticas e granitóides, que em parte tiveram sua origem no ciclo Brasiliano/Pan-Africano (0,9 - 0,5 Ga) (Almeida *et al.* 2000) e, em parte, de rochas mais antigas que sofreram retrabalhamento nesse ciclo (Riccomini & Coimbra 1992). As rochas alcalinas, entretanto, datam do Mesozóico, época associada à possível presença de uma (ou mais) pluma(s) mantélica(s) na Bacia do Paraná (Comin-Chiaramonti & Gomes 1995). Devido à presença de anomalia térmica e consequente domeamento, e/ou à descompressão adiabática resultante dos esforços atuantes, o manto continental sofreu fusões parciais sucessivas. Nesse processo foram geradas principalmente rochas básicas intermediárias e alcalinas, que constituem maciços ou numerosos e extensos diques direcionados para N40°/60°W (Silva & Batolla Jr. 1981). As rochas alcalinas constituem maciços, intrusivos nas litologias do embasamento que datam do Proterozóico Médio Inferior - Paleozóico Inferior (Campanha & Sadowsky 1999). As intrusões mesozóicas ocorrem segundo uma faixa aproximadamente SE - NW, manifestando-se com a presença de rochas alcalinas, alcalino-básicas ou alcalino-ultrabásicas (Silva & Algarte 1981). A geologia regional do Vale do Ribeira é apresentada na Fig. 2.

Ao mapear a distribuição de rochas alcalinas no sudeste do Brasil e leste do Paraguai, Almeida (1972) concluiu que sua localização é controlada pela tectônica regional. Posteriormente, Almeida (1983) agrupou várias ocorrências de rochas alcalinas em três grandes áreas, sendo que uma delas está associada à borda da Bacia do Paraná, que inclui grande número de corpos no Brasil, Paraguai e Uruguai: nesse grupo, as rochas alcalinas situam-se sobre o embasamento pré-Siluriano ou cortam os sedimentos da Bacia do Paraná e raramente são encontradas no platô basáltico.

Na América do Sul foram identificadas doze províncias alcalinas dentre as quais se insere a província alcalina do Arco de Ponta Grossa (Almeida 1983) que se estende dos limites meridionais do Estado de São Paulo até a região norte-nordeste do Estado do Paraná. Esses limites englobam a região do Vale do Ribeira, envolvendo um número expressivo de maciços, chaminés e diques, e reunindo grande variedade de tipos petrográficos associados às jazidas minerais. O soerguimento do Arco de Ponta Grossa ocorreu a 86 Ma, coincidindo com eventos magmáticos alcalinos no sudeste e sul do Brasil (Vignol-Lelarge *et al.* 1994, Almeida *et al.* 2000). Os principais maciços dessa província são Juquiá, Jacupiranga, Tunas, Banhadão e Bairro da Cruz (Ferreira *et al.* 1987). Aplicando o conceito de província alcalina e com base nas afinidades petrográficas, tectônicas e geocronológicas, Almeida (1983) dividiu a província do Arco de Ponta Grossa em duas sub-províncias: Guapiara e São Jerônimo-Curiúva. O



Cenozóico	Paleozóico Médio-Inferior	Paleozóico Superior
cs Conchiteia Sedimentar	VR Grupo Votuceraia Ribeira	gpi Granitóides Pós-Tectônicos
Mesozóico	VL Grupo Votuceraia Lajeado	Ag Complexo Agulhas Grandes
■ Complexos Alcalinos 1, 2, 3	Vri Formação Iporanga	SE Grupo Setuva
Paleozóico Inferior		
gm Complexo Gnaissico-Migmatítico		
— Lineamento Guapiara	— Falhas Transcorrentes	

Figura 2 - Mapa geológico da porção Sudeste do Cinturão Ribeira. As alcalinas da província tectônica Guapiara estão representadas no mapa como: (1) Juquiá; (2) Jacupiranga; (3) Pariquera-Açu. O complexo alcalino de Pariquera-Açu e o lineamento Guapiara foram adicionados ao mapa.

maciço alcalino de Pariquera-Açu foi incluído na sub-província de Guapiara, juntamente com os maciços de Juquiá e de Jacupiranga.

Investigações geológicas indicam que o complexo alcalino de Pariquera-Açu com área exposta de aproximadamente 6 km² e idade variando entre de 96 a 130 Ma é composto por shonkinitos (3,2-3,6 g/cm³) e malignitos (2,8 g/cm³), subordinados a veios de nefelina-sienito (2,63 g/cm³), (Gomes *et al.* 1989, Rugenski 2001). Localmente apresenta material brechado e os diques são intensamente alterados. O shonkinito é uma rocha sienítica máfica que apresenta afinidade com os álcalis, e o malignito é um termo usado para designar as rochas de nefelina-sienitos que contém mais de 50 % de minerais melanocráticos (S(Ø)rensen 1974). Os sienitos são rochas plutônicas com textura equigranular sendo classificadas, quanto à acidez, como intermediárias (52% a 65% de SiO₂), e tendo concentrações de plagioclásio de 10 % a 35 %, quartzo inferior a 5% e feldspato alcalino maior que 65 % (S(Ø)rensen 1974).

Considerando as concentrações e as densidades respectivamente, os minerais predominantes no complexo alcalino de Pariquera-Açu são: augita titanífera (20-70%; 3,2-3,6 g/cm³), feldspato potássico (10-50%; 2,56 g/cm³), nefelina (1-10%; 2,55-2,65 g/cm³), agregados feldspático-feldspatóidico-zeolíticos (2-15%; < 2,6 g/cm³), biotita (2-10%; 2,7-3,1 g/cm³), olivina (3-10%; 3,3-3,6 g/cm³), apatita (1-2%; 3,17-3,23 g/cm³) e magnetita (3-10%; 5,16-5,18 g/cm³) (Morbidelli *et al.* 2000, Ahrens 1995); esporadicamente ocorre plagioclásio e hornblenda parda (Silva & Algarte 1981). Sua forma oval apresenta-se com o eixo maior na direção de aproximadamente N45°W, sugerindo um condicionamento tectônico naquela direção, como já indicado por Algarte (1972) para as demais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná.

A rocha encaixante pertence à Sequência Turvo-Cajati, do grupo Setuva, (Silva & Algarte 1981, Campanha & Sadowsky 1999) ou mais precisamente à subseqüência Cajati (Silva & Batolla Jr. 1981), tendo o grupo Setuva idade do Proterozóico Superior (Campanha & Sadowsky 1999). A subseqüência Cajati apresenta como característi-

cas litológicas: mica-xisto (2,54-2,97 g/cm³) e quartzo-mica-xisto (2,70-2,96 g/cm³), sendo que próximo da intrusão alcalina, é representada mais especificamente por quartzo-muscovita-biotita-xisto (2,65-3,19 g/cm³), mica-xisto (2,72 g/cm³), filito (2,68-2,80 g/cm³) e metassiltito (2,59-2,85 g/cm³), (Morbidelli *et al.* 2000, Ahrens 1995, Rugenski 2001, Resales 1999, Slavec 2000). Rochas gnáissico-migmatíticas, do Paleozóico Inferior, afloram a menos de 5 km do complexo alcalino de Pariquera-Açu, sendo sobrepostas pelo grupo Setuva. O embasamento para o complexo alcalino configura-se então pelos metassedimentos do grupo Setuva e pelas rochas gnáissico-migmatíticas. A geologia local (Fig. 3), mostra que a intrusão é cortada por uma falha com direção N80°E (Silva & Batolla Jr. 1981).

LEVANTAMENTO GRAVIMÉTRICO O levantamento gravimétrico em escala de semi-detalle, na região que recobre a área da anomalia magnética de Pariquera-Açu, foi realizado em 1999 através do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG-USP). Trata-se de um método geofísico amplamente empregado em prospecção mineral, de custo relativamente baixo e que, por ser um método potencial, se integra perfeitamente aos dados magnéticos já existentes na área. Em escala regional a gravimetria permite identificar estruturas bi- e tridimensionais tais como falhas estruturais, contatos entre blocos tectônicos, direção, ângulo de mergulho e extensão superficial de unidades geológicas, adelgaçamento ou espessamento crustal e litosférico, entre outras.

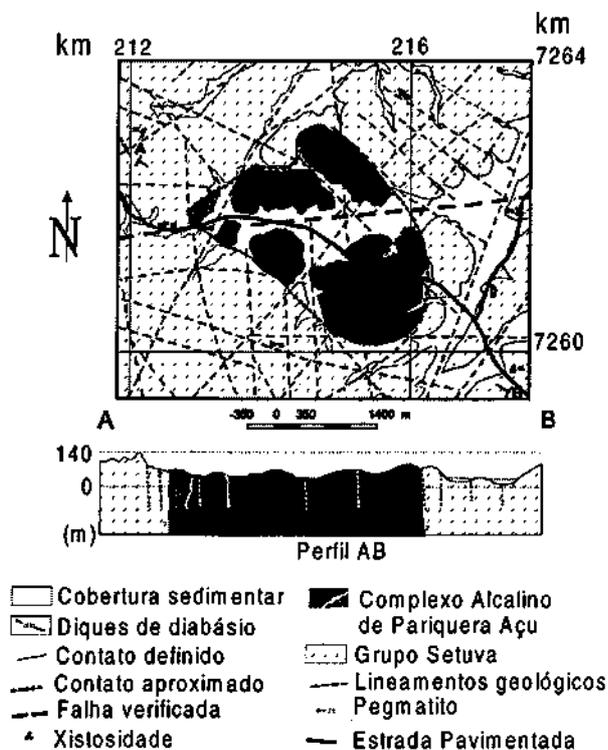


Figura 3 - Mapa geológico local do complexo alcalino de Pariquera-Açu (modificado de Ferreira *et al.* 1987).

Levantamentos gravimétricos em escala regional vêm sendo efetuados pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP) na porção S-SE do Brasil desde 1980, com a colaboração de várias instituições entre as quais o Observatório Nacional (ON), o Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE), a Companhia Nacional de Recursos Minerais que atualmente constitui o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a Universidade Federal do Paraná (UFPr) e a Escola Politécnica da USP (EPUSP). Esses levantamentos permitiram identificar as principais estruturas do embasamento exposto na área (Mantovani *et al.* 1989 e 1990) e do embasamento recoberto pelos sedimentos da Bacia do Paraná (Quintas 1995, Mantovani & Quintas 1995, Mantovani *et al.* 1995a), determinar a espessura elástica

equivalente (Te) de segmentos litosféricos (Mantovani *et al.* 1995b, Shukowsky & Mantovani 1999, Mantovani *et al.* 1999) entre outros resultados citados nessas publicações.

Em vista das dimensões do complexo alcalino, a distribuição espacial das estações gravimétricas, implantadas antes de 1999, não se apresentava adequada nessa área para a determinação do campo regional. Foi, portanto necessário, além de efetuar medidas sobre a área de interesse, estender o levantamento nas áreas adjacentes, mantendo espaçamentos maiores entre as novas estações implantadas fora da área de detalhe.

Uma vez que a gravimetria permite identificar e caracterizar corpos geológicos através de seu efeito gravimétrico, e que a densidade dos maciços alcalinos é maior que a média das rochas crustais, sua presença gera uma anomalia gravimétrica geralmente intensa. Através dessa anomalia é possível localizar e delimitar fisicamente esses maciços.

Aquisição de dados Os dados gravimétricos foram coletados com um gravímetro relativo LaCoste & Romberg tipo G. A acuracidade do equipamento é de 0,04 mGal e a deriva instrumental é inferior a 1 mGal/mês. Todas as medidas foram referidas à Rede Gravimétrica Fundamental do Brasil. O intervalo entre as estações de medida sobre perfis nas proximidades do complexo alcalino é de 250 m e para aquelas mais afastadas (distância da borda do complexo > 5 km) de 1 km, visando caracterizar o campo regional. A densidade espacial das estações, sobre o complexo alcalino, cumpre seu papel na amostragem do complexo como um todo permitindo posterior modelagem 3D, embora não seja suficientemente detalhada para fins de identificação e delimitação das variações litológicas internas.

A altitude ortométrica em cada estação gravimétrica foi determinada através de levantamento barométrico. Utilizaram-se dois tipos de barômetros: analógico e digital. O barômetro analógico, do tipo Thommen apresenta acuracidade inferior a 2 m para variações entre cotas superiores a 250 m. No local, o desnível altimétrico entre a base e as estações itinerantes não ultrapassou a cota de 150 m. Os barômetros digitais, com sensores "AIR-Intellisensor", possuem acuracidade superior aos analógicos. A principal crítica à utilização de barômetros reside na sua sensibilidade a variações climáticas que podem alterar repentinamente a pressão atmosférica, e com isso a medida de altitude. Com o intuito de minimizar essas possíveis variações, a máxima distância entre as estações itinerantes e a base foi mantida inferior a 40 km e a diferença de altitude entre ambas inferior a 150 m, uma vez que para esses limites a troposfera é considerada uma camada isotrópica. Adicionalmente, utilizaram-se 2 psicrômetros, um itinerante e outro na base, de forma a medir as variações de temperatura e umidade em cada ambiente, para ulteriores correções.

Existem dois controles para a qualidade do nivelamento barométrico segundo a metodologia adotada neste trabalho: (1) em todos os levantamentos executados utilizando nivelamento barométrico, uma fração das estações tem sido re-nivelada (reocupada) em dias diferentes, sob condições meteorológicas variáveis e referidas a diferentes bases fixas. A discrepância entre as cotas reocupadas (resíduos) é uma medida da qualidade do método barométrico. Para 211 reocupações efetuadas em 22 levantamentos utilizando nivelamento barométrico no período de 1995 a 2001, os resíduos atingem valor máximo de 3,5 m, com forte concentração no intervalo ± 1 m. O desvio padrão dos resíduos dessas 211 reocupações é de 1,21 m; (2) Durante o nivelamento barométrico realizado por ocasião de outro levantamento gravimétrico próximo à área de estudo (Juquiá), foi possível comparar quinze cotas niveladas por barometria com cotas correspondentes obtidas por posicionamento GPS de alta resolução. De um total de 15 pontos, resultou que a diferença máxima entre as cotas niveladas por barometria e por posicionamento GPS foi de 2,14 m, sendo o desvio padrão das diferenças igual a 0,96 m.

Com base nos dois controles de qualidade descritos, pode-se assumir que o desvio padrão do erro de nivelamento barométrico, efetuado de acordo com a metodologia utilizada, é de 1,2 m.

Redução dos Dados Foram aplicadas as correções gravimétricas devidas às variações temporais do campo (efeito da maré sólida), às variações da topografia (correção de Ar Livre) e ao efeito das massas

interpostas entre o ponto de medida e a superfície de referência (correção de Bouguer). As fontes de erro da anomalia Bouguer simples são o erro de medição da gravidade observada, o erro de posicionamento horizontal em latitude e o erro de nivelamento barométrico. A anomalia Bouguer simples é calculada como

$$\Delta g_B = g_{obs} - \gamma(\phi) + C_F h + C_B h$$

onde g_{obs} é a gravidade observada, $\gamma(\phi)$ é o valor da gravidade de referência de acordo com a Fórmula Internacional da Gravidade, h é a altitude ortométrica da estação, C_F é o coeficiente de correção de Faye (correção de ar-livre) e C_B é o coeficiente de correção Bouguer, sendo:

$$\gamma(\phi) = 978031,85 + (5,278895 \cdot 10^{-3} \text{sen}^2(\phi) + 2,3462 \cdot 10^{-5} \text{sen}^4(\phi)) \text{ mGal}$$

$C_F = 0,3086 \text{ mGal/m}$ e $C_B = -0,1119 \text{ mGal/m}$, para a densidade de redução padrão de 2670 Kg/m^3 .

O erro de posicionamento horizontal influencia a anomalia Bouguer através da Fórmula Internacional da Gravidade. Considerando que o gradiente da gravidade de referência de acordo com Fórmula Internacional da Gravidade é igual a $0,6045 \text{ mGal/km}$ na área de estudo, e que o desvio padrão do erro de posicionamento em latitude por posicionamento GPS de baixa resolução, utilizado neste trabalho, é $\sigma_\phi = 50$ metros, resulta que o desvio padrão da componente do erro da

anomalia Bouguer simples devida ao erro de posicionamento GPS é $\sigma_a = 0,6045 \text{ mGal/km} \cdot \sigma_\phi$, ou seja, $a = 0,030 \text{ mGal}$.

O erro de nivelamento barométrico influencia a anomalia Bouguer através do termo $C_F h + C_B h = 0,1947h$. Utilizando para o desvio padrão do erro do nivelamento barométrico o valor $\sigma_h = 1,2$ metros, resulta que o desvio padrão da componente do erro da anomalia Bouguer simples devida ao erro de nivelamento vale $(7 = 0,1947(7, \text{ ou seja, } (\sigma_2 = 0,234 \text{ mGal}$.

Finalmente, o desvio padrão do erro da gravidade observada (acurácia do gravímetro) é $(\sigma_3 = 0,04 \text{ mGal}$.

Levando em conta que os três erros acima discutidos são estatisticamente independentes, resulta que o desvio padrão do erro da anomalia Bouguer simples vale $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$, ou seja, $\sigma_B = 0,239 \text{ mGal}$.

A correção de terreno não foi aplicada uma vez que resulta da ordem de décimos de mGal, pois em correspondência e ao redor do complexo a topografia apresenta-se suave (Fig. 4a). Os pontos observados na figura 4a representam as estações gravimétricas.

No mapa da anomalia de Ar-livre (Fig. 4b) observa-se um gradiente gravimétrico EW de grande comprimento de onda, que não apresenta correlação com a topografia, indicando que o gradiente observado estaria relacionado à estruturas profundas. No mapa de anomalia Bouguer (Fig. 4c) nota-se que o complexo alcalino apresenta um contraste de densidade, relativamente às rochas encaixantes, que permite delimitá-lo através do levantamento gravimétrico. As principais características gravimétricas da área levantada são o seu gradiente de 12 mGal , o curto comprimento de onda, e a forma elíptica típica de intrusões ígneas do tipo alcalino na região do Vale do Ribeira.

Na redução dos dados verificou-se que o complexo alcalino de Paríquera-Açu apresenta forte gradiente gravimétrico positivo destacando-se do campo regional, tendo, portanto, uma densidade superior à da rocha encaixante. A anomalia apresenta forma elíptica e concêntrica, com maior eixo direcionado aproximadamente a $N45^\circ W$, coincidindo com o formato da intrusão em superfície. Não sendo possível distinguir anomalias internas ao complexo, conclui-se que a intrusão se comporta do ponto de vista gravimétrico como um corpo homogêneo, podendo ser verificado em sua modelagem.

As anomalias regionais Bouguer e de Ar Livre, apresentam uma tendência na direção EW próxima ao complexo alcalino. Esse gradiente sugere a existência de uma feição geológica subsuperficial. Diante da escassez de informações geológicas e de outros métodos geofísicos relacionados ao alto gravimétrico, e não existindo sinal magnético associado, atribui-se o gradiente EW próximo ao complexo alcalino a uma variação lateral do embasamento.

Processamento dos Dados Ao processar os dados buscou-se o método matemático mais adequado para a estimativa da anomalia gravimétrica residual. Foram analisados três métodos: Filtro Butterworth, Ajuste Polinomial por Mínimos Quadrados e Polinômio Robusto (Rugenski 2001).

O polinômio robusto (Beltrão *et al.* 1991) é uma generalização do método de mínimos quadrados, tendo-se revelado o melhor dentre os três citados. Aos dados experimentais foi aplicado o polinômio robusto de grau 6 (Fig. 5).

A análise do mapa residual Bouguer obtido através do polinômio robusto (Fig. 5) mostra que houve um refinamento do campo regional obtido a partir dos mínimos quadrados (Fig. 4c), resultando ao final do processamento, na ampliação do máximo valor anômalo em correspondência da intrusão alcalina. Esse método forneceu a melhor resposta em comparação aos outros métodos, principalmente porque não apresenta efeito de borda.

MODELOS O complexo alcalino de Paríquera-Açu foi modelado pelos métodos de inversão com geometria 2,5 D e 3 D. Ambos os métodos de ajuste tiveram respostas semelhantes. A modelagem 2,5 D está sujeita a algumas limitações, uma vez que o campo de gravidade apresenta componentes nas três dimensões. Quando um corpo com geometria 3 D é interpretado com geometria 2,5 D, há perda de detalhamento lateral afetando a densidade interna do corpo ou a máxima profundidade modelada. A análise conjunta dos dois métodos, associada a todas as informações disponíveis permite avaliar a incerteza dos parâmetros envolvidos considerando-se as características do método potencial (Blakely 1995, Meju 1994).

Interpretação 2.5 D Para a modelagem 2.5 D foi usado o programa "GRAVMAG" (Pedley *et al.* 1993), considerando-se uma extensão lateral de 3 km.

Na modelagem utilizaram-se informações disponíveis do aerolevante gamaespectrométrico e magnetométrico na área (CPRM 1995). A aeromagnetometria apresentou uma resposta marcante na delimitação do complexo alcalino, enquanto que a aerogamaespectrometria evidência de anomalias ao redor e internamente ao complexo alcalino, que podem refletir uma variação litológica, zonas de metassomatismo, zonas de fratura ou apenas uma variação na concentração dos radioelementos. A anomalia gravimétrica apresenta uma auréola negativa ao redor do complexo alcalino que, no entanto, não é observada no sinal magnético correspondente (Rugenski 2001).

A modelagem gravimétrica com geometria 2,5 D do complexo alcalino foi realizada ao longo dos perfis assinalados na figura 6, cujos resultados são apresentados na figura 7 (a e b). Os perfis foram orientados de forma a atravessarem o eixo principal do complexo (GH) e a anomalia radiométrica (U), cruzando-se no ponto de coordenadas (215,21, 7261,21), próximo ao centróide do complexo alcalino a 5,6 km do perfil GH.

No perfil GH a profundidade máxima do complexo alcalino é de 4,5 km, considerando sua densidade $3,12 \text{ g/cm}^3$ e a densidade da rocha encaixante $2,67 \text{ g/cm}^3$. O valor de densidade atribuído ao complexo alcalino corresponde em média aos valores de densidade das litologias shonkinito ($3,2-3,6 \text{ g/cm}^3$) e malignito ($2,8 \text{ g/cm}^3$) (Cermak & Hemholz 1982). Nesse mesmo perfil, modelou-se um corpo de menor densidade, interno ao complexo alcalino, com densidade média correspondente àquela do malignito. Na porção esquerda do perfil GH, a anomalia não se ajusta adequadamente ao modelo devido à presença da "auréola" ao redor da intrusão. Ao longo do perfil IJ, obteve-se uma profundidade de 2,3 km. A diferença dos valores das profundidades modeladas reflete a geometria do complexo alcalino em profundidade.

Na figura 8 mostra-se o resultado da modelagem da auréola gravimétrica que circunda o complexo alcalino, assumindo uma densidade de $1,0 \text{ g/cm}^3$, sendo as densidades da rocha encaixante de $2,67 \text{ g/cm}^3$ e do complexo alcalino de $3,12 \text{ g/cm}^3$. A máxima profundidade do corpo correspondente à auréola alcança o valor de 35 m. Esse modelo constitui o limite inferior na estimativa da espessura que ajusta a auréola anômala, uma vez que, para valores de contraste de densidade inferiores, a profundidade resultante do ajuste gravitacional será maior do valor fornecido por esse modelo.

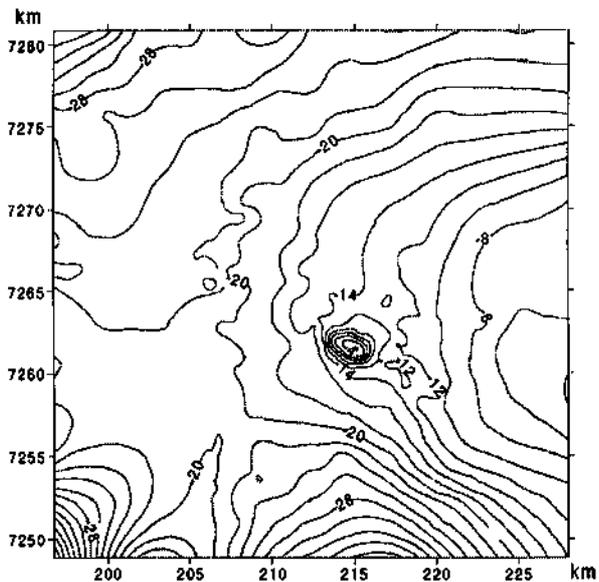
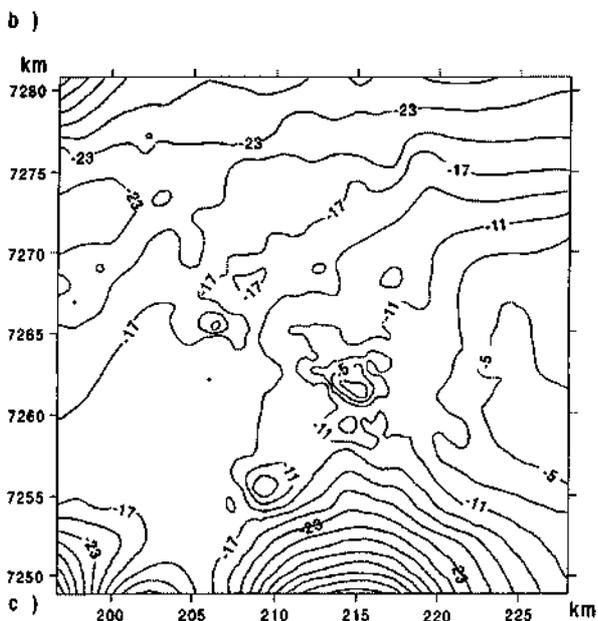
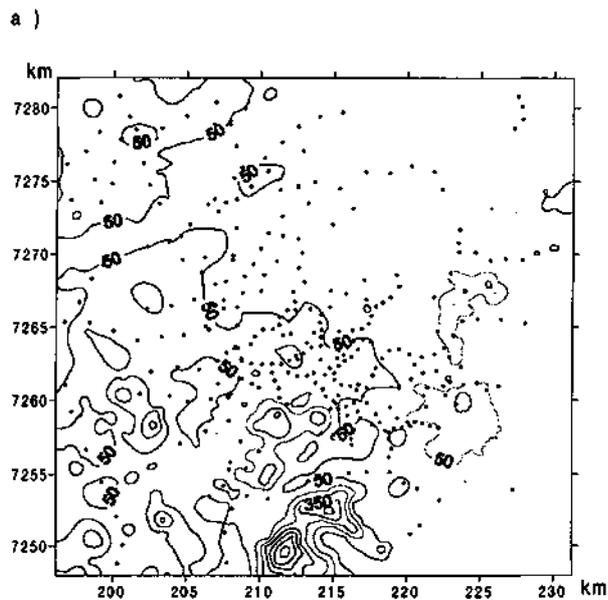


Figura 4 - (a) A representação da topografia (m); (b) mapa da anomalia de Ar-livre; (c) mapa de anomalia Bouguer.

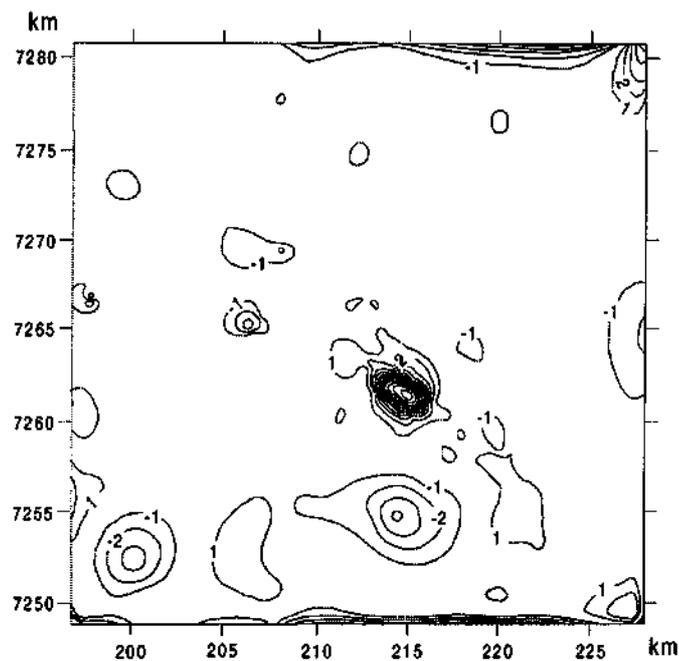


Figura 5 - representação do resíduo do polinômio robusto de grau 6 calculado a partir dos dados do levantamento gravimétrico.

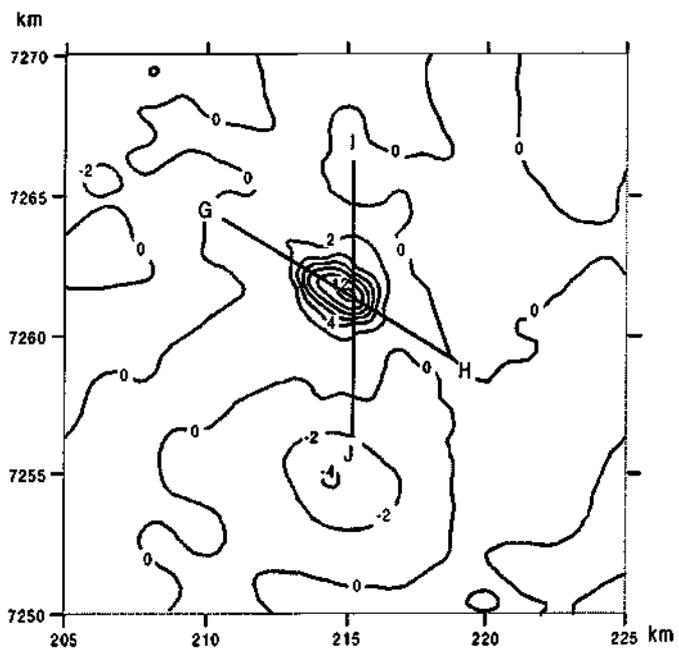


Figura 6 - Mapa residual Bouguer (polinômio robusto de grau 6), observa-se a posição dos perfis GH e IJ ao longo dos quais foram realizados os modelos 2.5D.

Modelo 3 D, com formatos prismático e irregular FOR-MA PRISMÁTICA Feições geológicas, que apresentam formato semelhante a um cilindro vertical (ex. diques e condutos ou "necks") ou a um prisma de seção poligonal irregular podem ser modeladas em 3 D através do programa de cálculo "GPCYLNIN" (Radhakrishna Murthy & Swamy 1996). Os parâmetros do modelo: profundidade da base e topo, contraste de densidade e dimensões, são determinados iterativamente buscando o melhor ajuste à anomalia Bouguer observada.

O programa requer para dados de entrada, a profundidade do topo e da base do prisma e o número e a posição dos vértices da área poligonal; esses correspondem aos valores iniciais para a determinação

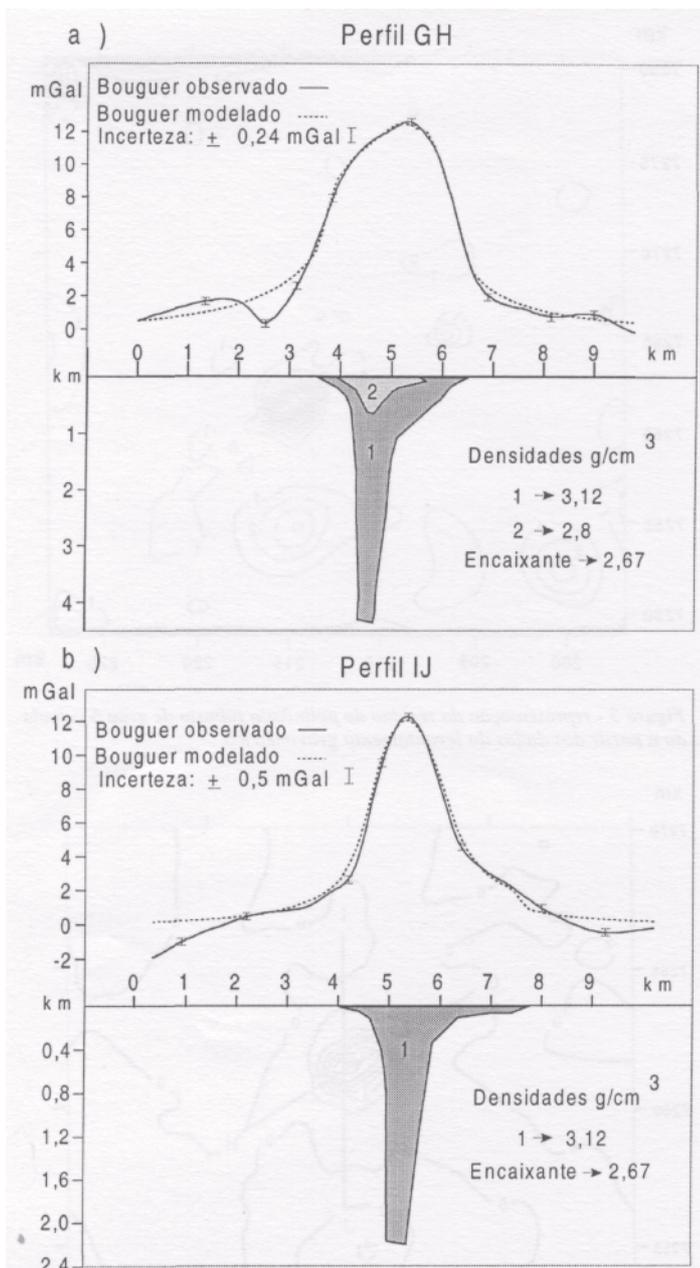


Figura 7 - Modelagem gravimétrica 2,5 D do complexo alcalino de Paríquera-Açu. A base do corpo modelado está a uma profundidade de 4,5 km da superfície, para o perfil (a) GH e (b) 2,35 para o perfil IJ.

da geometria do modelo. O resultado final é alcançado quando a variação dos parâmetros calculados se estabiliza após um determinado número de iterações, apresentando o melhor ajuste. O modelo em superfície (Fig. 9) representou bem as dimensões aflorantes do complexo alcalino e as faces do prisma coincidem com alguns lineamentos e falhas.

No mapa de anomalia Bouguer as curvas sólidas são as isolinhas dos dados observados e as curvas tracejadas à anomalias calculadas para o modelo. Verifica-se a convergência entre as mesmas, próximo do complexo alcalino, mas não ao seu redor. O polígono de cor cinza representa o limite o prisma modelado em planta, ou seja, um prisma de seção poligonal, com contraste de densidade de $0,4 \text{ g/cm}^3$, profundidade do topo de $0,01 \text{ km}$ e base de $4,7 \text{ km}$. As retas com terminações ortogonais indicam as direções das falhas e dos lineamentos geológicos. Observa-se uma coincidência dos lineamentos com as faces do modelo prismático. Conclui-se que o modelo prismático (Fig. 10) ajustou para o contraste de densidade $0,4 \text{ g/cm}^3$, uma profundidade do topo em $0,01 \text{ km}$ e da base em $4,7 \text{ km}$. Com esses parâmetros o campo anômalo observado para o complexo alcalino é equivalente ao campo gerado pelo modelo.

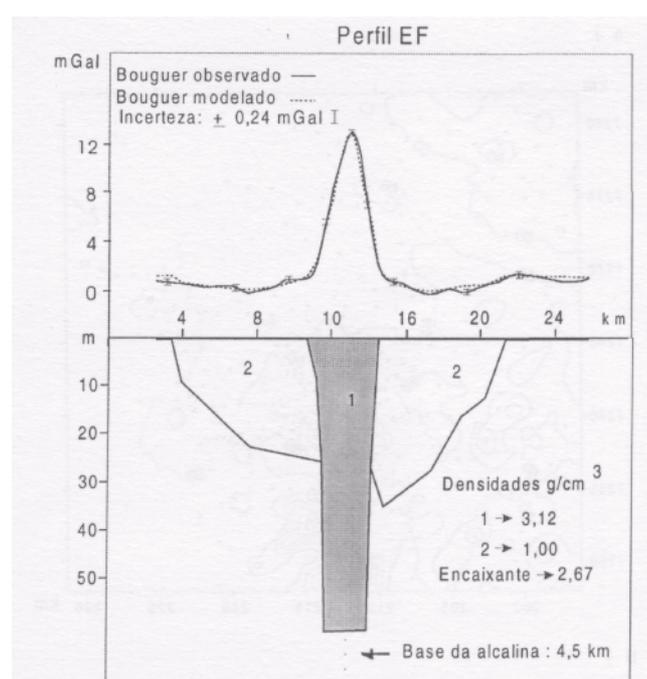


Figura 8 - Modelo 2,5 D da auréola negativa localizada ao redor do complexo alcalino, obtido a partir do mapa anômalo Bouguer através da solução de mínimos quadrados de grau 6. O modelo do corpo 2 foi extrapolado para uma situação hipotética onde existe apenas água.

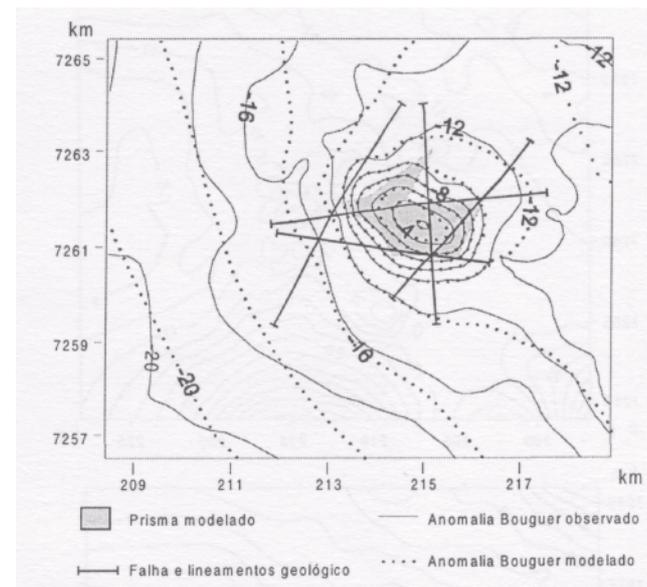


Figura 9 - Mapa da anomalia Bouguer: as curvas sólidas correspondem às isolinhas do campo anômalo observado e aquelas tracejadas às do campo anômalo modelado. O polígono de cor cinza representa a seção horizontal do prisma modelado com contraste de densidade de $0,4 \text{ g/cm}^3$, profundidade do topo de $0,01 \text{ km}$ e base de $4,7 \text{ km}$. Os segmentos de retas com terminações ortogonais indicam as direções da falha e dos lineamentos geológicos.

Uma segunda forma prismática aplicada à modelagem corresponde a um paralelepípedo oblíquo. Utilizou-se para essa finalidade o programa "IGMAS" (Schmidt 1998). Trata-se de um programa de modelagem 3D com aplicativos estatísticos (histogramas, desvio padrão e coeficiente de correlação). Na figura 11, apresenta-se o mapa da anomalia Bouguer observada e modelada para o paralelepípedo, bem como sua análise estatística; a análise estatística fornece o desvio padrão do modelo, o histograma das diferenças da gravidade (observado menos modelo) para cada ponto em cada perfil, seu coeficiente de correlação e o respectivo desvio. O paralelepípedo foi modelado para uma densidade de $3,12 \text{ g/cm}^3$, sendo a densidade da rocha encaixante $2,67 \text{ g/cm}^3$ e as profundidades do topo 0 km e da base $2,2 \text{ km}$. A área

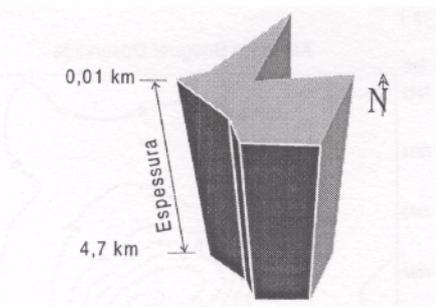


Figura 10 - Modelo 3 D do complexo alcalino de Paríquera-Açu através de um prisma de seção poligonal. O modelo se ajusta aos parâmetros físicos do complexo alcalino. O prisma foi obtido através do programa "GPCYLNIN".

superficial de 2,48 km² resultou inferior àquela observada para o complexo alcalino (6 km²), sendo o volume obtido de 5,45 km³ e a massa de 0,24 x 10¹⁰ t. As principais semelhanças entre o campo modelado e aquele observado são: tendência direcional do campo que está relacionada à direção de alojamento do complexo alcalino; magnitude e extensão de anomalia equivalentes. Na análise estatística verifica-se que os resíduos entre o campo observado e o modelado são elevados. Levando-se em consideração somente as laterais do complexo, notam-se variações anômalas da ordem de 2 mGal que resultam da diferença de área calculada vs. observada. Na porção central do complexo, o resíduo é próximo a zero, indicando que o modelo pode ser representativo das profundidades (base e topo) e do contraste de densidade. O modelo apresenta bons índices estatísticos com coeficiente de correlação de 0,97 e desvio padrão ± 0,63 mGal. Através do histograma verifica-se que a média dos resíduos, entre as anomalias Bouguer calculada e observada, é próxima a zero.

A conclusão geológica extraída deste modelo não difere sensivelmente daquela apresentada para o primeiro prisma de seção poligonal. Na figura 12, encontra-se esquematizado um perfil que atravessa o corpo modelado. O modelo tridimensional é visualizado na figura 13.

FORMA IRREGULAR Os modelos anteriores, 2,5 D e 3D prismáticos, foram confeccionados com o intuito de comparar a geometria e as propriedades físicas de corpos localizados com forma simples, que fossem representativos do complexo alcalino. As informações obtidas através desses modelos foram utilizadas para uma análise crítica das limitações do método, principalmente quanto à profundidade máxima estimada para a base do complexo alcalino. Foram aplicadas na convergência de um modelo 3 D de formato irregular (programa IGMAS), que pudesse ser não apenas satisfatório do ponto de vista geofísico como também representativo geologicamente.

Na figura 14 apresenta-se o mapa da anomalia Bouguer observada e modelada para o formato irregular (a), a distribuição das diferenças entre as duas e sua análise estatística (b). O complexo alcalino foi modelado para uma densidade de 3,14 g/cm³, encaixada no embasamento de densidade 2,67 g/cm³. Uma vez que o complexo aflora, a profundidade do topo é considerada 0 km e a sua máxima profundidade resultou em 8,93 km. A área superficial é equivalente àquela de um corpo alcalino com 6 km², seu volume é de 8,26 km³ e a sua massa de 0,38 x 10¹⁰ t. Os campos observado e modelado mantêm a mesma tendência direcional, mesma magnitude e mesma área anômala. A discrepância entre os campos observado e modelado é de 0,8 mGal sendo que apenas 3 % dos dados tem desvios superiores a esse valor. A análise estatística apresenta um coeficiente de correlação de 0,98, um desvio padrão dos resíduos de 0,55 mGal, sendo que a média dos resíduos é próxima de zero.

O modelo 3D de formato irregular sugere que o complexo alcalino, do ponto de vista gravimétrico, corresponde a um corpo homogêneo. Neste caso, a provável variação litológica interna ao complexo alcalino inferida através dos dados radiométricos torna-se desprezível diante do volume da rocha. A profundidade média de 4,5 km resultante do modelo 2,5 D é coerente com os valores obtidos para as duas outras alcalinas próximas de Paríquera-Açu, Juquiá e Jacupiranga, respectivamente de 7,5 km e 6,5 km, modeladas com geometria 2,5 D (Slavec 2000, Slavec et al. 2000, Resales 1999).

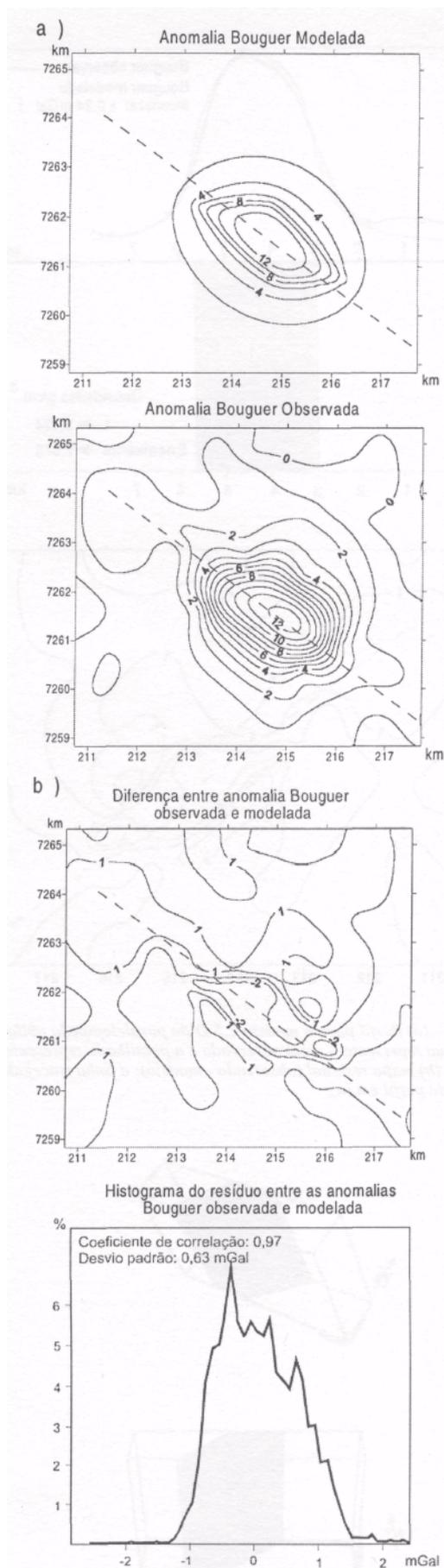


Figura 11 - (a) Modelo do campo gravitacional calculado para um paralelepípedo obliquo aplicado à modelagem do complexo alcalino de Paríquera-Açu; a linha tracejada indica a posição do perfil do modelo 2,5D; (b) Mapa residual (observado - modelo e análise estatística).

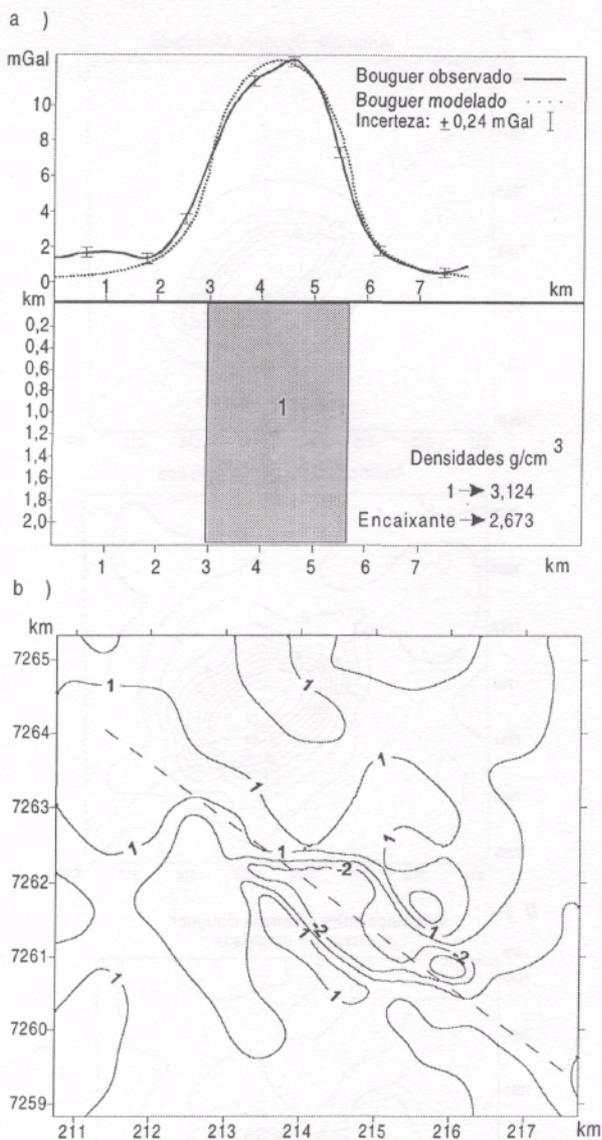


Figura 12 - (a) Perfil para o modelo 2,5 D do paralelepipedo oblíquo, a linha contínua representa o sinal observado e a pontilhada representa aquele modelado; (b) mapa residual (observado - modelo); a linha tracejada indica a posição do perfil em (a).

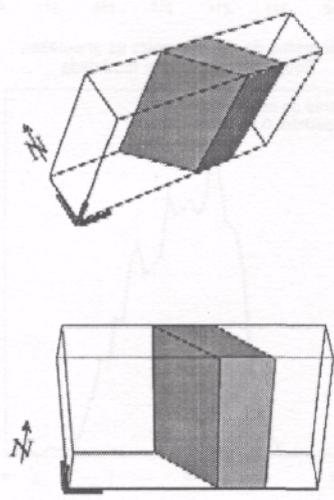


Figura 13 - Visualização 3 D do paralelepipedo oblíquo modelado para o complexo alcalino de Paríquera-Açu.

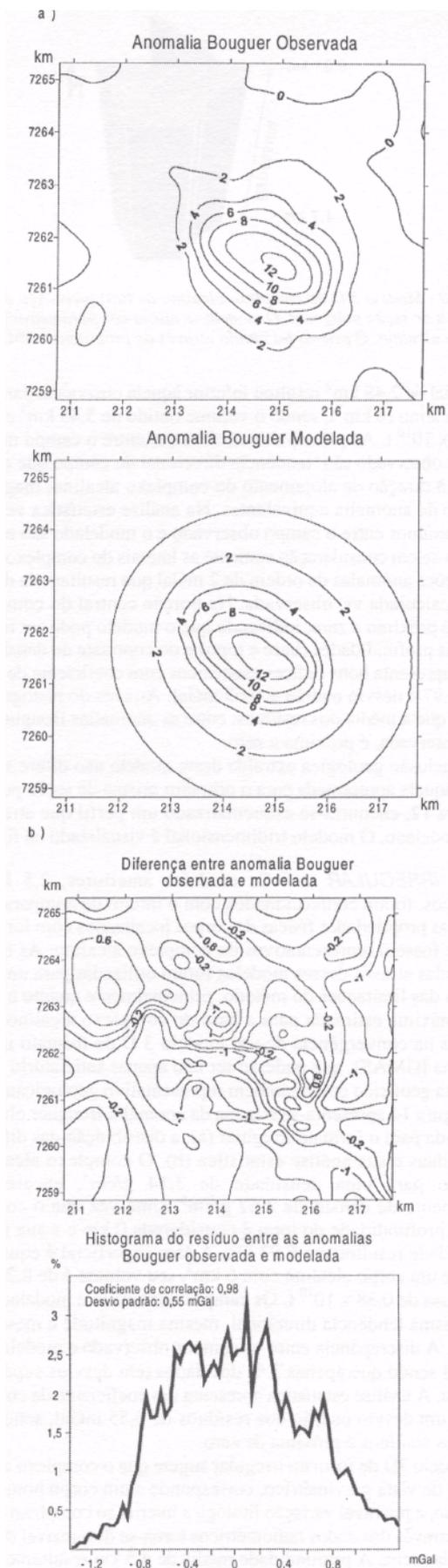


Figura 14 - (a) Modelo do campo gravitacional calculado para um formato irregular, aplicado à modelagem do complexo alcalino de Paríquera-Açu. (b) Análise estatística.

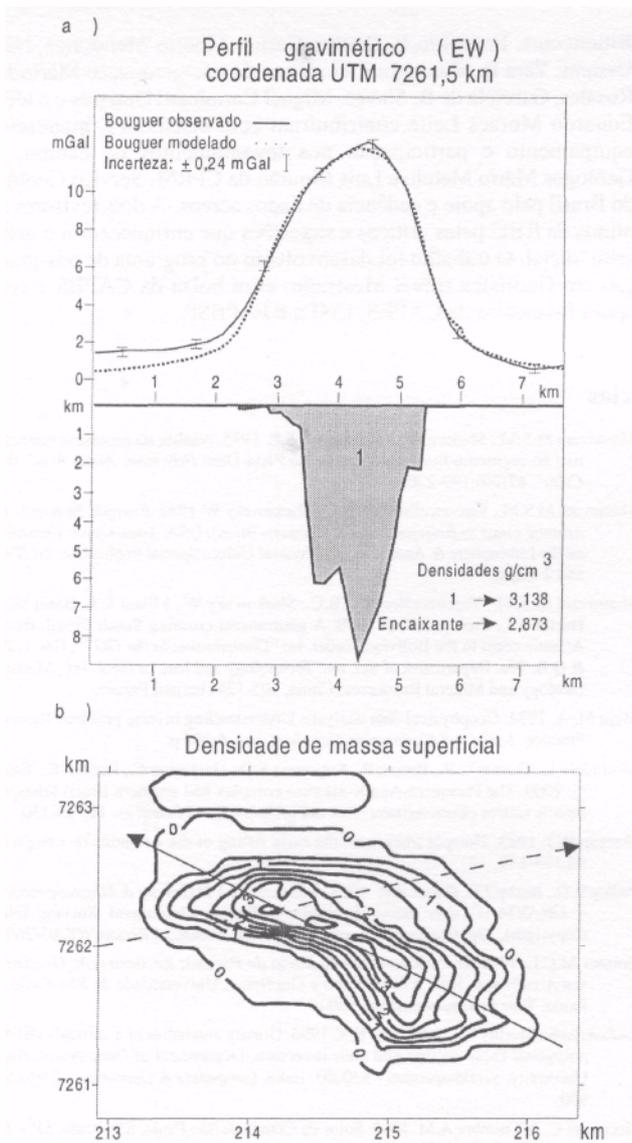


Figura 15 — (a) Perfil para o modelo 2,5 D com forma irregular e (b) mapa de densidade superficial. A seta contínua representa a direção do lineamento Guapiara, e aquela tracejada a falha que corta o complexo alcalino.

A forma do complexo alcalino, derivada dos modelos 2,5 D e 3 D, é do tipo de alojamento discordante. Embora essa seja a forma mais comum associada a esses corpos (conjunto de diques, condutos), já foram observadas rochas do tipo gnaisse sienito e nefelina sienito, de mesma composição do complexo alcalino de Pariquera-Açu, com formas concordantes (soleira e lacólito) (Sørensen 1974).

Na Fig15(b) a direção do eixo principal do complexo alcalino em superfície coincide com aquela do Lineamento Guapiara (~ N45°W; Fig. 15b), sugerindo que o eixo principal da distribuição da massa alcalina se alinha com as direções preferenciais do cenário tectônico regional (Almeida 1972). Com a mesma direção NE das falhas de Lancinha e Ribeira, o Complexo de Pariquera-Açu é cortado por uma outra falha. Próximo dessa estrutura observam-se fraturas que cortam o complexo alcalino, obviamente posteriores ao seu alojamento. Entre as possíveis hipóteses, a falha que corta o complexo alcalino (Fig. 3) pode ter sofrido uma reativação posteriormente ao seu alojamento, uma vez que a maior concentração de massa do complexo alcalino se encontra ao longo do eixo N67°W, ou seja, ortogonal à direção dessa falha (Rugenski 2001).

Considerando a geometria do complexo prefere-se o modelo 3 D irregular. Na figura 15a observa-se o perfil EW que atravessa o complexo. O modelo tridimensional resultante de todos os perfis realçados é visualizado na figura 16. Nota-se que o modelo caracteriza a existência de raiz. A composição da rocha alcalina é sienítica, formada por

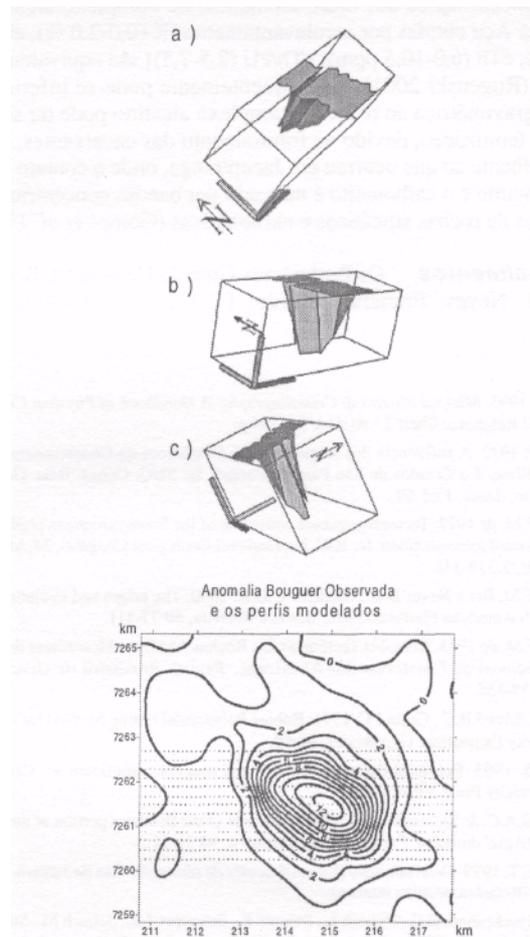


Figura 16 - (a, b e c) Visualização 3 D do modelo de formato irregular para o complexo alcalino de Pariquera-Açu por três ângulos diferentes.

magma intermediário, sendo a concentração de sílica inferior àquela apresentada por rochas ácidas. Magmas mais viscosos formariam corpos com uma geometria mais "arredondada", como no caso dos granitos (Button & Donald 1996).

Em comparação aos modelos, 2,5 D e 3 D apresentados anteriormente, observa-se um melhor ajuste para o modelo com raiz. Os modelos prismáticos que não levam em consideração a raiz, não se ajustam tão bem ao campo gravitacional observado.

CONCLUSÃO Gravimetricamente, o complexo alcalino de Pariquera-Açu é um corpo homogêneo. A modelagem 3 D forneceu como parâmetros: densidade de 3,14 g/cm³, sendo o contraste de densidade de 0,46 g/m³ em relação à rocha encaixante; o complexo aflora em superfície e tem profundidade máxima de 8,93 km; área superficial de 6 km²; volume de 8,26 km³, e massa de 0,38 x 10¹⁰t. Geometricamente assemelha-se a um prisma irregular, com sua maior área transversal na superfície, apresentando em profundidade um afinamento da seção transversal. A profundidade máxima obtida para o complexo alcalino é semelhante àquela de Juquiá e de Jacupiranga, também identificados como complexos alcalinos localizados no Vale do Ribeira, respectivamente com 7,5 km e 6,5 km de profundidade (Slavec 2000, Slavec et al 2000, Rosales 1999, Resales 1999), obtidas por modelagem gravimétrica 2,5 D.

A distribuição de massa na superfície indica que o alojamento do complexo alcalino foi controlado pela tectônica regional, corroborando a conclusão de Almeida (1972) de que a localização das rochas alcalinas no sudeste do Brasil e leste do Paraguai está relacionada à tectônica regional. A direção do eixo de maior concentração de massa do complexo alcalino é próxima àquela da direção do lineamento Guapiara da província tectônica do Arco de Ponta Grossa (Campanha & Sadowsky 1999).

As concentrações dos radio-elementos no complexo alcalino de Paríquera-Açu obtidas por aerolevantamento [K (0,0-2,0 %); eU (1,8-2,5 ppm); eTh (6,0-10,5 ppm); eTh/eU (2,5-7,5)] são equivalentes aos sienitos (Rugenski 2001). Consequentemente pode-se inferir que a auréola gravimétrica ao redor do complexo alcalino pode ter sido gerada por fenitização, devido ao fraturamento das encaixantes, de forma semelhante ao que ocorreu em Jacupiranga, onde o contato entre o jacupiranguito e o carbonatito é marcado por bandas concêntricas de alternadas de rochas silicáticas e carbonáticas (Gomes *et al* 1989).

Agradecimentos Os Professores Ginaldo Campanha, Benjamin B. de B. Neves, Francisco Hiodo, Eder cassola Molina, Jorge

Bittencourt, Eronaldo B. Rocha, Carlos Alberto Mendonça, Naomi Ussami, Yara R. Marangoni, os alunos da pós-graduação Mario Jesus Rosales, Gabriela de B. Slavec, Miguel Carminatti Guterres e o técnico Eduardo Moraes Leite contribuíram com discussões, manuseio de equipamento e participação nos levantamentos de campo. Aos Geólogos Mário Metelo e Luis Mourão da CPRM, Serviço Geológico do Brasil pelo apoio e cedência de dados aéreos. A dois revisores anônimos da RBG pelas críticas e sugestões que enriqueceram o manuscrito inicial. O trabalho foi desenvolvido no programa de pós-graduação em Geofísica (nível Mestrado) com bolsa da CAPES e com o apoio financeiro da CAPES, CNPq e FAPESP.

Referências

- Ahrens T.J. 1995. *Mineral Physics & Crystallography. A Handbook of Physical Constants*. AGU Reference Shelf 2 - AGU-USA 354 p.
- Algarte J.P. 1972. A Influência dos Arqueamentos Cratônicos no Condicionamento das Alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In: SBG. Congr. Bras. Geol., 26, Belém, *Anais*, 1:65-69.
- Almeida F.F.M. de 1972. Tectonomagmatic activation of the South American platform and associated mineralization. In: IGC, International Geological Congress, 24, Montreal, *Anais*, 3:339-346.
- Almeida F.F.M., Brito Neves B.B., Carneiro C.D.R. 2000. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, 50:77- 111.
- Almeida F.F.M. de 1983. Relações Tectônicas das Rochas Alcalinas Mesozóicas da Região Meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências*, 13:139-158.
- Beltrão J.F., Silva J.B.C., Costa J.C. 1991. Robust Polynomial Fitting Method for Regional Gravity Estimation. *Geophysics*, 80-89.
- Blakely R.S. 1995. Potential theory in gravity and magnetic applications. Cambridge University Press, USA, 441 p.
- Campanha G. A.C. & Sadowsky G.R. 1999. Tectonics of the Southern portion of the Ribeira belt (Aparai domain). *Pre Cambrian Research*, 98:31-51.
- Cardoso C.E.T. 1979. *Determinação dos coeficientes de absorção*. Rio de Janeiro, CPRM, 12p. (Relatório técnico interno).
- Cermák V., Huckenholz H.G., Rybach L., Schmid R., Schopper J.R., Schuch M., Stöffer D., Wohlenberg J. 1982. *Landolt - Börnstein: Numerical data and functional relationships in Science and Technology*. New York. Springer - Verlag Berlin, Heidelberg, 373 p.
- Comin-Chiaromonti & Gomes C.B. 1995. *Alkaline magmatism in central eastern Paraguay: Relationships with coeval magmatism in Brazil*. São Paulo, Edusp/Fapesp, 458p.
- CPRM 1995. *Geologia - Catálogo Geral de produtos e serviços - Levantamentos Aerogeofísicos, Base de Dados AERO*. Ministério de Minas e Energia, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais Diretoria de Geologia de Recursos Hídricos. 2ª. Edição ampliada, 360p.
- Crough S.T. 1983. Rifts and Swells: Geophysical Constraints on Casualty. *Earth and Planetary Science Letters*, 94:23-27.
- Ferreira F.J.F. & Algarte J.P. 1979. O comportamento aeromagnetométrico - cintilométrico das principais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná In: SBG/SP, Simp. Reg. Geol., 2, Rio Claro. *Actas*, 2:195-208.
- Ferreira F.J.F., Algarte J.P., Theodorovicz A., Monma R., Martins F.A.G., Tassinari C.G.C., Silva R.B., Rodrigues E.P., Coutinho J.M.V. 1987. A alcalina de Paríquera Açu. In: SBG/SP, 6º Simp. Reg. Geol., 1, Rio Claro, Ato, 1:159-171.
- Gomes C. B., Ruberti E., Morbidelli L. 1989. Carbonatite Complex from Brazil: A review. *J. South Amer. Earth Sci.*, 3:51-63.
- Mantovani M.S.M. 1993. *Tectonic implications of Bouguer anomalies Southern Brazil and Uruguai*. International Workshop Panafrican-Brasiliano Geology Scientific Program, IG-USP, São Paulo-SP, outubro (Programa do Evento).
- Mantovani M.S.M., Quintas M.C.L., Shukowsky W. 1995. Framework of Paraná Basin Basement: a Geophysical Contribution from Gravity data. In: IUGG, XXI General Assembly, Boulder - Colorado, *Abstracts*, A420.
- Mantovani M.S.M. 1995. Evolução do Cinturão Ribeira: Compartimentação Geofísica. In: SBG/SP. IV Simpósio de Geologia do Sudeste, Águas de São Pedro, S.P., *Resumos Expandidos*, 5p.
- Mantovani M.S.M. & Quintas M.C.L. 1995. Geophysical Framework of the Paraná Basin Basement in the Brazilian Territory. In: Academia Brasileira de Ciências, Sessão Regular, "Ciências da Terra: a transição Proterozóico-Cambriano no Brasil", (Coord. A. Rocha Campos) - Instituto de Geociências, USP, 30 de novembro, São Paulo, *Anais Acad. Brasil. de Ciênc.*, 68:602.
- Mantovani M.S.M., Quintas M.C.L., Shukowsky W. 1995. Framework of Paraná Basin Basement: a Geophysical Contribution from Gravity data. In: IUGG, XXI General Assembly, Boulder - Colorado, *Abstracts*, A420.
- Mantovani M.S.M., Shukowsky W., Freitas S.R.C. de 1999. Tectonic pattern of South America inferred from tidal gravity anomaly. *Phys. Earth Planet. Int.*, 114(1-2):91-98.
- Mantovani M.S.M., Shukowsky W., Hallinan S.E. 1995. Análise da espessura elástica efetiva no segmento litosférico Rio de La Plata-Dom Feliciano. *Anais Acad. Brasil. Ciênc.*, 67(20): 199-220.
- Mantovani M.S.M., Vasconcellos A.C.B.C., Shukowsky W. 1989. *Brusque Transect - From Atlantic coast to Bolivian border, Southern Brazil*. USA, Inter-Union Commission on the Lithosphere & American Geophysical Union, Special Publication, GGT4,22p and 2 maps.
- Mantovani M.S.M., Vasconcellos A.C.B.C., Shukowsky W., Milani E.J., Basei M.A.S., Hurter S.J., Freitas S.R.C. 1990. A geotranssect crossing South Brazil, from the Atlantic coast to the Bolivian border, in: "Contribution to the GGT", Eds. L.P. Cui & Q.B. Wu. Department of Sci. and Technology and Inst. of Geol. Inf., Ministry of Geology and Mineral Resources, China, 105-124 (Invited Paper).
- Meju M. A. 1994. Geophysical data analysis: Understanding inverse problem Theory and Practice. *Society of Exploration Geophysicists*, 6:296 p.
- Morbidelli L., Gomes C.B., Brotzu P., Acuarica S.D., Garbarino C., Ruberti E., Traversa G. 2000. The Paríquera-Açu K-alkaline complex and southern Brazil lithospheric mantle source characteristics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18:129-150.
- Morgan W.J. 1983. Hotspot tracks and the early rifting of the Atlantic. *Tectonophysics*, 94:123-139.
- Pedley R.O., Busby J.P., Dabek Z.K. 1993. *Interactive 2.5 D Gravity & Magnetic modelling - GRAVMAG user manual*, England, British Geological Survey, (NERC Copyright), 73p. (Regional Geophysical Series, Technical Report WK/93/26/R)
- Quintas M.C.L. 1995. *O Embasamento da Bacia do Paraná: Reconstrução Geofísica de seu Arcabouço*. Inst. Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 120 p.
- Radhakrishna Murthy I. V. & Swamy K. V. 1996. Gravity anomalies of a vertical cylinder of polygonal cross-section and their inversion. Department of Geophysics, Andhra University, Visakhapatnam - 530003, India. *Computers & Geosciences*, 22(6):625 - 630.
- Riccomini C. & Coimbra A.M. 1992. Solos da Cidade de São Paulo. São Paulo, SP, - USP/IC, 37-43, (Boletim 2).
- Rosales M.J.T. 1999. *Caracterização geofísica do complexo intrusivo ultrabásico-alcalino de Jacupiranga, (SP)*. São Paulo, Inst. Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, p. 120.
- Rugenski A. 2001. *Investigação geofísica do complexo alcalino Paríquera-Açu, com ênfase em gravimetria*. Inst. São Paulo, Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 77 p.
- Schmidt S. 1998. *3D modeling of geoid and gravity using CIS-functions and IGMAS manual for UNIX v. 2.4.3*. Germany, Freie Universität, Berlin, 8p.
- Sørensen H. 1974. *The alkaline rocks*. USA, John Wiley & Sons, 622p.
- Shukowsky W. & Mantovani M.S.M. 1999. Spatial variability of tidal gravity anomalies and its correlation with the effective elastic thickness of the lithosphere. *Phys. Earth Planet. Int.*, 114:81-90.
- Silva A. T. S. F. & Batolla Jr. F. 1981. *Projeto Integração e detalhe Geológico no Vale do Ribeira*. São Paulo, CPRM/DNPM, 3:237, (Relatório final).
- Silva A.T.S.F. & Algarte J.P. 1981. Contribuição à geologia da Sequência Turvo-Cajati entre o Rio Pardo e Paríquera-Açu, Estado de São Paulo. I.-Litologia e Petrologia. In: SBG, Simp. Reg. Geol., 3, Curitiba, Ato-, 1:109-120.
- Slavec G. B. 2000. Estudo Gravimétrico do Complexo Alcalino de Juquiá, SP. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, Trabalho de Graduação, 50p.
- Slavec G. B., Mantovani M. S. M., Shukowsky W. 2000. O Complexo Alcalino de Juquiá, SP. *Rev. Bras. Geoc.* (no prelo)
- Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A. 1976. *Applied geophysics*. Cambridge Press, 770p.
- Vignol-Lelarge M.L.M., Soliani Jr. E., Poupeau G. 1994. *Datação pelos traços de fissão do domínio meridional da Serra do Mar (Arco de Ponta Grossa)*. In: SBG, Boi. Rés. Expandidos, 38 Congres. Brasil.Geol. Balneário Camboriú, 2:379-380.

Manuscrito A-1216
Recebido em 12 de março de 2001
Revisão dos autores em 10 de setembro de 2001
Revisão aceita em 15 de setembro de 2001