

Artigo Submetido para publicação no Instituto de Geociências-USP, Série Didática.

Investigação Geofísica do Complexo Alcalino de Ipanema, São Paulo, Brasil.

André Rugenski e Marta Silvia Maria Mantovani e Wladimir Shukowsky

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, USP

Rua do Matão, 1226 – CEP 01408-001, SP.

e-mails: andrerrug@iaq.usp.br, marta@iaq.usp.br, wladimir@iaq.usp.br

Resumo

O Complexo Alcalino de Ipanema localizado na província alcalina de mesmo nome (23°27,5' S e 47°38' W) dista aproximadamente 140 km de São Paulo, e há 40 anos foi tema de estudo geofísico em programa de Doutorado (Davino, 1965). Os métodos empregados foram o gravimétrico, magnetométrico, e eletrorresistivo (SEV). Entretanto, os dados gravimétricos então levantados não foram referenciados à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira, nem à Rede de Nivelamento do IBGE, o que impossibilita sua integração e utilização com outros bancos de dados. Optou-se, então, por efetuar um novo levantamento na área e adjacências, de forma a integrá-lo aos dados de levantamentos geofísicos próximos referidos às duas redes citadas, uma vez que o complexo alcalino em questão é parte de um estudo integrado desses corpos na região S-SE do Brasil (CNPq, n° 471426/03). O presente estudo concentra-se no método gravimétrico, tendo como resultado a geometria do corpo em subsuperfície bem como o cálculo de seu volume.

Abstract

The studied area, is located in the Ipanema Alkaline Province (23°27,5' S e 47°38' W) approximately 140 km west of São Paulo city. This geological structure was subject of a PhD study which made use of gravity, magnetic and electro-resistivity methodologies (Davino, 1965). Nevertheless, the gravity data surveyed were neither referred to the Fundamental Brazilian Gravity Network (ON) nor to the Brazilian Reference Leveling Network (IBGE), preventing its integration with other data base. Since the alkaline complex under analysis is part of an integrated study of a number of such bodies in S-SE Brazil (CNPq project n° 471426/03) a new survey was established in the same and neighboring areas, in order to integrate the obtained data with other geophysical surveys referred to both networks. In the present study, only the gravity method is used to obtain the geometry and volume of the buried body.

Introdução

O presente trabalho constitui parte de um projeto mais amplo que integra o estudo das principais manifestações alcalinas da região S-SE do Brasil. Alguns complexos do conjunto selecionado já foram detalhados quanto a sua geometria em subsuperfície com o intuito de verificar a existência de correlação entre a forma de alojamento e a tectônica que atuou no processo geológico que os originou (Slavec et al. 2001 e 2004; Rugenski et al. 2001 e 2004; Mantovani et al., 1999 e 2005).

O complexo alcalino de Ipanema, localizado na província alcalina de mesmo nome, aproximadamente a 140 km de São Paulo, (23°27,5' S e 47°38' W), foi estudado com a utilização de métodos geofísicos, pela primeira vez, por Davino (1965). Os métodos então

empregados foram os métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) e a eletrorresistividade (SEV).

Devido à natureza dos métodos potenciais, que permite (1) discriminar no espectro de frequência as componentes das fontes localizadas em diferentes profundidades e, portanto, separá-las, (2) analisar o sinal de cada componente sobre uma superfície e não apenas ao longo de perfis, e, finalmente, (3) delimitar lateralmente a fonte causadora da anomalia, desde que exista um contraste de densidade mensurável entre a fonte e a rocha encaixante, os torna mais adequados para a investigação das intrusões magmáticas, mesmo se comparados aos métodos sísmicos (Vigneresse, 1995).

Para realizar uma modelagem da geometria em subsuperfície do corpo que aflora, os dados gravimétricos descritos por Davino (1965) necessitavam de maior detalhamento, em particular para o cálculo do campo regional. Além disso, as medidas gravimétricas então levantadas utilizaram um gravímetro do tipo Nörgaard que, comparativamente ao Lacoste & Romberg, (modelo G) atualmente e aqui empregado, apresenta acurácia muito inferior. Além disso, no trabalho pioneiro foi assumido o valor de cota nula numa estação de referência localizada no município de Itu-SP sem, entretanto, constar qualquer especificação da Referência de Nível (RN) utilizada, ou sua descrição e posição geográfica. Sendo que esse tipo de tratamento inviabiliza a adição de novos dados ao levantamento existente sem introduzir descontinuidades no campo gravitacional resultante, optou-se por efetuar um novo levantamento gravimétrico na mesma região.

Apresenta-se em seguida a metodologia utilizada na obtenção das várias componentes do campo gravimétrico, e a modelagem do complexo em subsuperfície, com geometria tridimensional, a qual permitiu determinar o volume do mesmo.

Geologia da área

O complexo alcalino de Ipanema, com área que aflora de 8 km², situa-se morfologicamente na Serra de Araçoiaba, uma feição topográfica aproximadamente circular, tendo o ponto culminante aproximadamente 967 m de altitude, e a média regional cerca de 570 m. A estrutura é composta por rochas alcalinas e seus produtos; observa-se que nas proximidades do complexo, as rochas encaixantes (embasamento) foram soerguidas devido ao alojamento da intrusão alcalina.

A idade do complexo de Ipanema foi calculada pelo método K-Ar, resultando em aproximadamente 123 Ma (Amaral et al., 1967), datando, portanto, do Cretáceo Inferior. Este valor de idade o classifica quase contemporâneo às rochas alcalinas mais próximas, como por exemplo, Jacupiranga (132Ma) e Juquiá (130 Ma).

As principais litologias alcalinas reconhecidas são compostas por glimeritos e shonkinitos (Toledo & Souza, 1991). O glimerito é uma rocha ígnea máfica formada quase que essencialmente por biotita. O shonkinito, um sienito máfico, é composto principalmente por augita e feldspato alcalino, contendo subordinadamente olivina, hornblenda, quartzo (de 0-5%) e feldspatóides (de 0-10%). Circundando o glimerito, encontram-se fenitos, rochas oriundas de processos metassomáticos ao redor de intrusões alcalinas (Sørensen, 1974).

As rochas encaixantes são compostas por sedimentos e metassedimentos permocarboníferos do Grupo Tubarão, e pelo embasamento cristalino Pré-Cambriano. O Grupo Tubarão é composto pelas litologias: tilito, arenito, siltito, folhelho e ritmitos. O embasamento contém quartzitos, filitos, micaxistos, granitos e anfibolitos, sendo que, a Norte da manifestação glimerítica, observam-se depósitos autóctones localizados do tipo evaporítico, representados por calcário (Figura 1).

A xistosidade das rochas metassedimentares apresenta em média atitude N50E e os mergulhos são próximos da vertical. Nas proximidades dos afloramentos alcalinos os metassedimentos encontram-se extremamente deformados e fraturados.

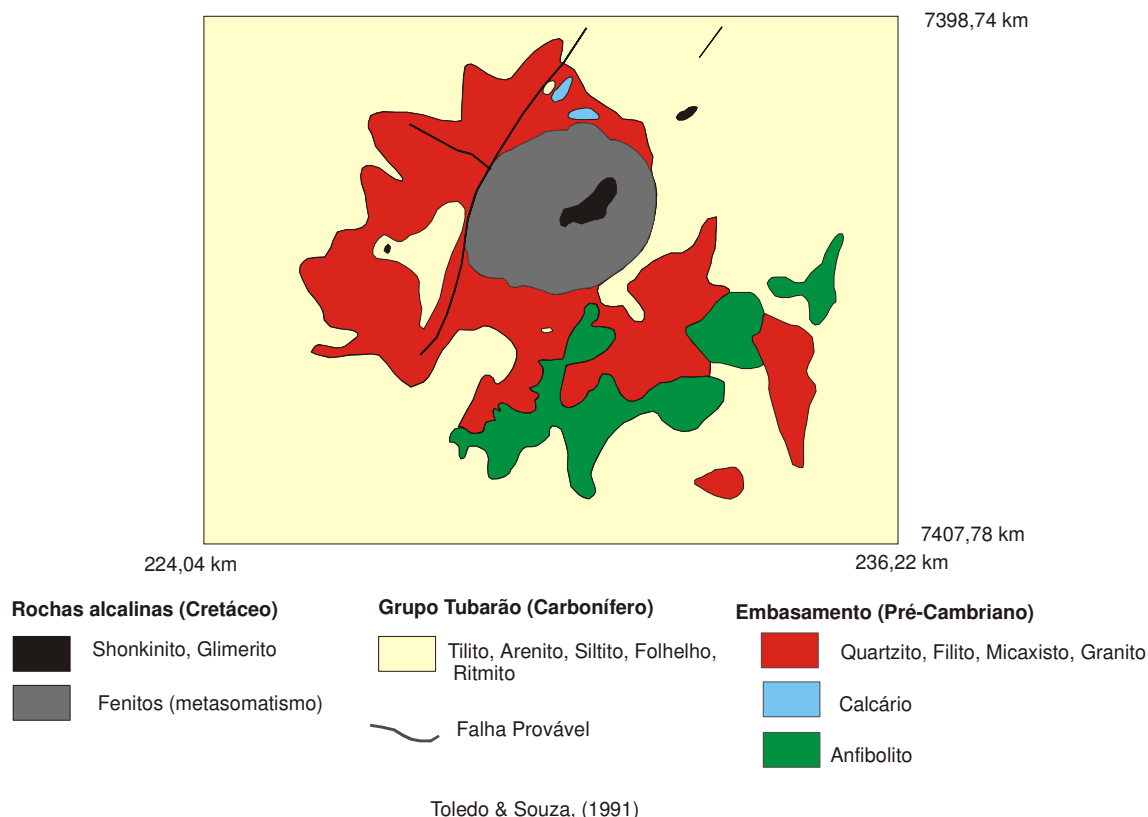


Figura 1. Mapa geológico do complexo alcalino de Ipanema (extraído de Toledo & Souza, 1991).

O complexo encontra-se alojado na porção limítrofe oriental da Bacia do Paraná. Com base nos resultados gravimétricos de Davino (1965; FIGURA 2) e, considerando a presença de outras manifestações alcalinas localizadas nos municípios de Tatuí e Piedade, e os alinhamentos das intrusões shonkiníticas observadas em dois pequenos afloramentos na região externa ao fenito, e ao glimerito, Almeida (1983) sugeriu que, durante o Cretáceo, o alojamento de Ipanema foi controlado por reativações de falhas pré-silurianas na borda da Bacia do Paraná. Essas falhas são orientadas na direção NE-SW.

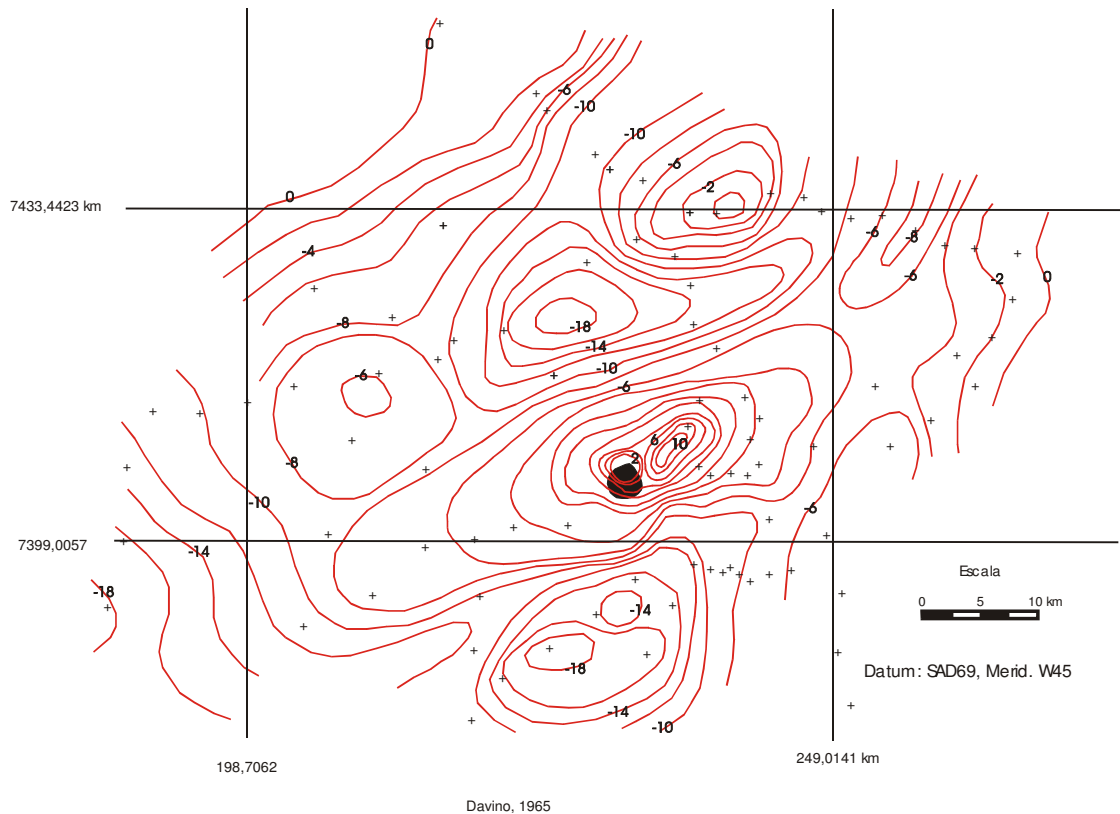


Figura 2. Mapa de anomalia Bouguer de Davino (1965). As isolinhas estão separadas a cada 2 mGal. A estrutura quase circular “cheia” representa a localização do afloramento alcalino. As estações são apresentadas pelas cruzes.

Correlações entre o alojamento das rochas alcalinas e as encaixantes foram observadas por Knecht (1930) e Moraes (1938). Segundo esses autores o magma se dispersou nas rochas encaixantes, desenvolvendo corpos tabulares e lenticulares ao longo dos planos de xistosidade, com direção aproximada de N50E, conclusão esta corroborada pela disposição das jazidas de magnetita e apatita em lentes alongadas na direção NE-SW. Evidências do regime tectônico e dos esforços envolvidos na borda da Bacia do Paraná sugerem que o alojamento da intrusão ocorreu num regime de injeção forçada, com metros de rejeito, em conseqüência ao soerguimento do embasamento.

Na imagem da topografia da região (Figura 3), se distinguem os dois domínios geológicos citados: a Bacia do Paraná (a oeste) e o embasamento (a leste). O afloramento do complexo alcalino de Ipanema observado no domínio da Bacia do Paraná, corresponde à estrutura quase-circular apresentando desníveis topográficos da ordem 400 m. Na imagem não se identificam lineamentos ou mesmo falhas geológicas nas proximidades da alcalina, enquanto que contatos e falhas transcorrentes na direção NE-SW são observados na porção do embasamento.

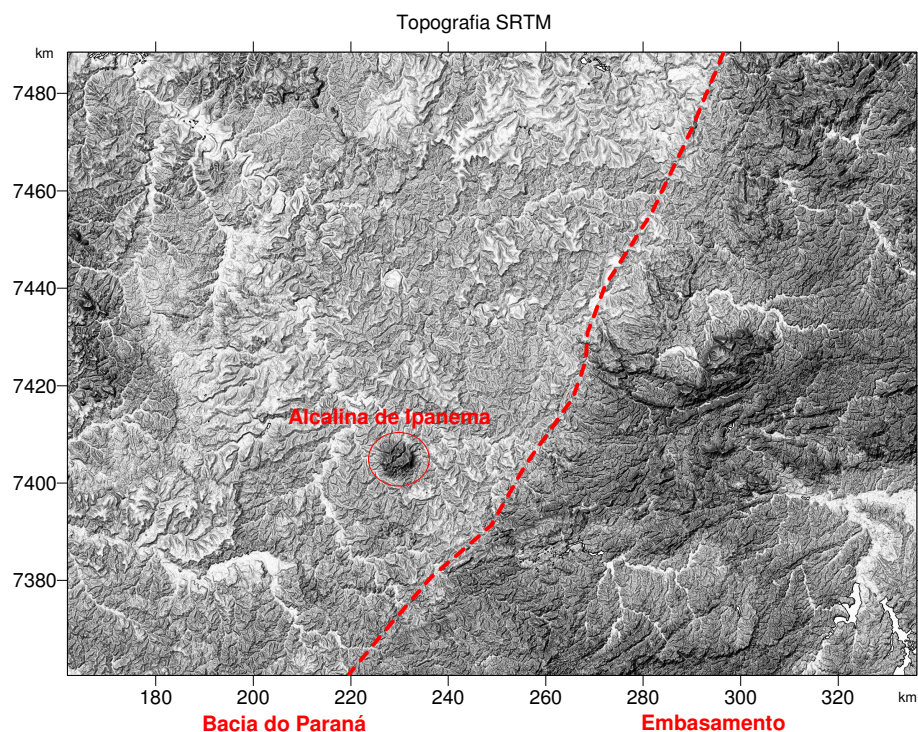


Figura 3. Imagem da topografia da região de estudo, obtida com os dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do projeto NASA/USGS. Observam-se claramente dois Domínios geológicos, sendo compostos pela Bacia do Paraná e embasamento. A região de contato entre os Domínios é indicada pela linha tracejada. A alcalina é visualizada pelo círculo (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

Metodologia

O estudo geofísico, aqui apresentado, limita-se ao levantamento gravimétrico realizado para o presente trabalho, que foi executado especificamente para o estudo do corpo responsável pela anomalia. Para a implantação das estações gravimétricas, foram percorridas estradas, vias secundárias e trilhas.

O cálculo da anomalia de gravidade exige o conhecimento da altitude exata no ponto de medida. No presente levantamento, a medida da altitude de cada estação utilizou o método barométrico com base fixa. Todas as medidas foram referidas à Rede de Nivelamento do IBGE, e a metodologia utilizada é descrita adiante em detalhe.

Levantamento gravimétrico

Todas as medidas gravimétricas do levantamento aqui descrito foram referidas à RGFB tomando como referência a EG n° 011276 Jundiá, estação tipo "B", cota gravimétrica 978613.496 mGal, com incerteza de 0.014 mGal. Uma descrição detalhada da sistemática utilizada encontra-se descrita em (Mantovani et al., 2005).

Sendo que as medidas foram efetuadas em diversas etapas de visita à área de interesse, em vista da disponibilidade de equipamentos foram alternadamente utilizados dois gravímetros da marca LaCoste & Romberg, modelo G, sendo um com *feed-back aliód 100* (#913) e o outro com *feed-back analógico* (#996). Os dois valores entre parênteses identificam

cada gravímetro pelo seu número de fabricação. As leituras instrumentais no #913 são fornecidas diretamente em unidades de mGal, enquanto que o #996 apresenta leituras proporcionais ao mGal, sendo necessária sua transformação através de uma tabela de calibração específica do instrumento. A acurácia do gravímetro #913 é superior àquela do #996 que por sua vez não é inferior a 0,04 μ Gal.

O levantamento altimétrico utilizou o método barométrico com base fixa. A altitude foi medida em correspondência a cada estação gravimétrica levantada. As bases altimétricas, para áreas num raio inferior a 30 km e desníveis altimétricos inferiores a 200 m, foram transportadas da RN mais próxima, localizada em Indaiatuba-SP (coordenadas geográficas: -23.18, -46.88; cota: 738.5234 m) para o local onde eram efetuadas medidas de altimetria por pressão atmosférica, umidade e temperatura a cada 10 minutos, situada nas coordenadas: -23.26523, -47.29802, sendo a cota transportada de 587.95 m. Simultaneamente, a “estação móvel” efetuava medidas de altitude barométrica, temperatura e umidade, além da leitura de g em cada nova estação gravimétrica.

Para a base fixa foram utilizados dois altímetros barométricos digitais “Air-DB Intellisensor” e um altímetro analógico Thommen enquanto que, na estação móvel, foram utilizados dois altímetros Thommen e um altímetro digital portátil da Intellisensor. Seja na base fixa como na estação itinerante, foram feitas medidas de temperatura com o bulbo dos termômetros seco e úmido, para o cálculo da umidade relativa do ar. A distribuição dos erros para esse método de medida, tem como desvio padrão aproximadamente 0,5 metros, representando menos de 0,2 mGal na medida de g (McLintock et al., 1994). Note-se que a incerteza na medida da altimetria, de muito supera as demais envolvidas no cálculo da propagação de erros. O erro máximo cometido no presente levantamento altimétrico foi de 3 metros, resultando ainda num erro inferior a 1 mGal, e o erro de fechamento gravimétrico foi inferior a 0,25 mGal na anomalia Bouguer.

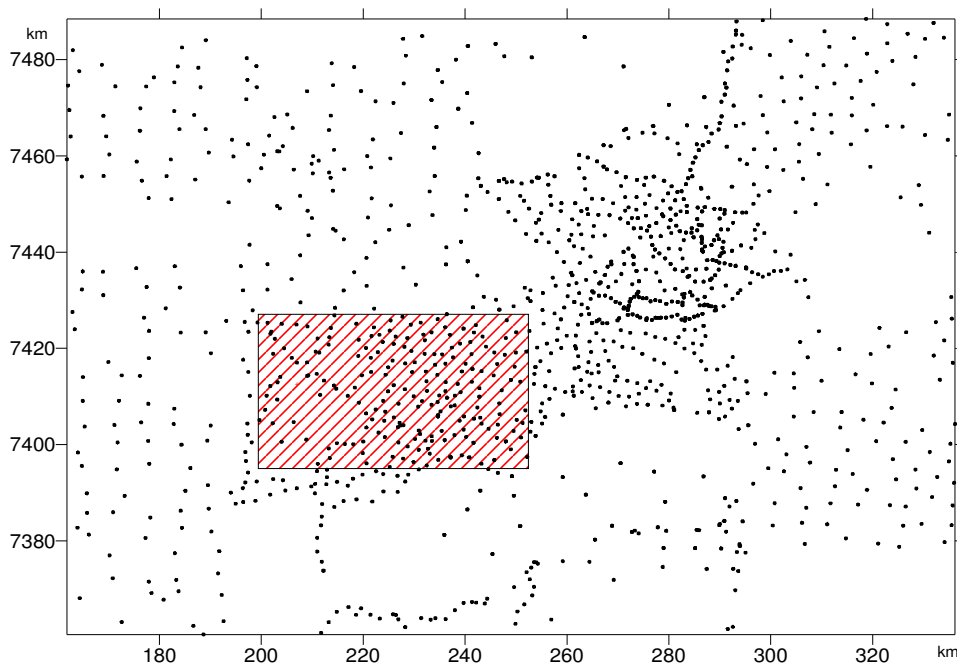


Figura 4. Os pontos representam as estações gravimétricas. A região selecionada indica a posição do complexo alcalino de Ipanema e proximidades.

No período de novembro de 2003 a janeiro de 2004 foram medidas 410 estações gravimétricas que, adicionadas àquelas do banco de dados disponível junto ao grupo de pesquisa, resultaram num total de 1527 (Figura 4). Sobre o complexo alcalino foi coberta uma área de 22.305,52 km², com intervalos inferiores a 4 km entre as estações implantadas. Infelizmente, não foi possível efetuar mais medidas em correspondência ao complexo alcalino diante dos prazos exigidos, incompatíveis com aqueles necessários para a obtenção de autorização junto ao IBAMA, já que a área constitui uma reserva ambiental.

Cálculo das Anomalias de Gravidade

O cálculo das anomalias de gravidade em cada ponto de medida leva em consideração as medidas de “g”, da altitude, do efeito de maré sólida (Longman, 1959), e o valor teórico da gravidade calculado para o geóide de referência.

A gravidade de referência é definida pela Fórmula Internacional da Gravidade de 1967,

$$g_{teórico} = \gamma(\varphi) = 978031.85 \cdot (1 + 5.278895 \cdot 10^{-3} \text{sen}^2 \varphi + 2.3462 \cdot 10^{-5} \text{sen}^4 \varphi) \text{ mGal} \quad (1)$$

onde φ é a latitude geodésica da estação gravimétrica.

A anomalia Bouguer é calculada pela expressão

$$\Delta g_B = g_{obs} - \gamma(\varphi) + 0,3086 \cdot h - 2\pi G\rho \cdot h \quad (2)$$

sendo $G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ a constante da gravitação universal e ρ a densidade de massa da crosta superior continental.

A anomalia Bouguer calculada pela fórmula (2) acima, é denominada *anomalia Bouguer simples*, e não leva em conta o efeito do relevo. No presente levantamento, a correção de relevo não foi aplicada em vista da topografia pouco acidentada na região de interesse. Na Figura 5 apresenta-se o campo anômalo Bouguer total, calculado para a área que compreende o complexo alcalino de Ipanema e litologias vizinhas (eq. 2). Observa-se uma anomalia positiva alongada na direção NE-SW, em acordo com aquela apresentada por Davino (1965). A área da anomalia circunscreve a parte exposta do complexo alcalino, sugerindo a presença de material magmático de mesma origem, em profundidade.

Comparando a topografia com o campo anômalo Bouguer, verifica-se que a posição da Serra de Araçoiaba, onde aflora a maior parte do complexo alcalino, não corresponde ao máximo valor anômalo. Observa-se também que o afloramento do shonkinito a NE da rocha fenitizada (FIGURA 1), está localizado entre a borda da serra e o máximo valor anômalo da alcalina.

Determinação das Componentes Regional e Residual

A representação gravimétrica da anomalia Bouguer, contém as várias componentes de freqüências características de corpos superficiais com diferentes geometrias, dimensões e densidades que contrastam com as rochas encaixantes, de corpos intermediários e profundos ou de limites de camadas com composições mineralógicas diferentes. Para separar as componentes devidas às várias unidades geológicas, analisa-se o espectro das freqüências que contribuem para o sinal gravimétrico composto, e utilizam-se filtros numéricos para isolar as componentes de cada faixa de freqüência selecionada. Os filtros que selecionam os maiores comprimentos de onda (“passa baixa”) são geralmente utilizados para determinar a componente gravimétrica regional, ou *campo regional*, devida a corpos de dimensões da escala crustal ou litosférica.

O campo gravimétrico regional pode ser determinado de várias formas, sendo a mais utilizada a representação polinomial, cujos parâmetros são definidos por ajuste de mínimos

quadrados. O grau do polinômio dependerá da geometria, dimensão e disposição espacial dos vários corpos isolados e dos segmentos crustais e litosféricos característicos de cada área.

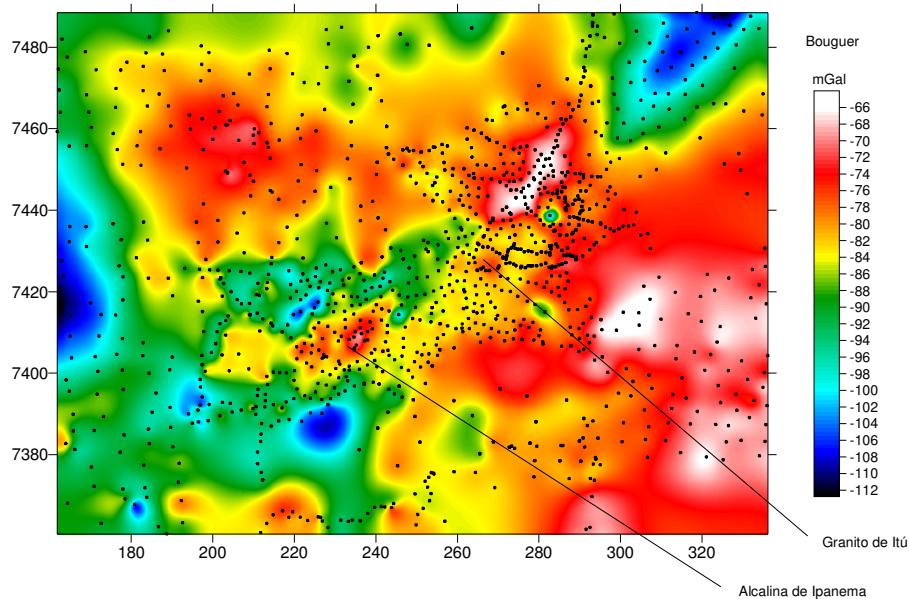


Figura 5. Anomalia Bouguer da região de estudo. A anomalia da alcalina de Ipanema está indicada no mapa. Os pontos correspondem às estações de medida. Observa-se na parte oriental, em correspondência ao embasamento, uma tendência positiva, relativamente à porção da bacia, com exceção da anomalia localizada sobre o complexo alcalino.

Muitas vezes, a presença de um corpo com características tridimensionais (3D) marcantes, pode distorcer o campo regional e introduzir componentes devidas apenas ao corpo isolado, como se observa no caso em estudo. Essas distorções podem ser eliminadas com a utilização do método do “polinômio robusto” descrito por Beltrão e colaboradores (1991).

Uma maneira alternativa de eliminar essas distorções é o uso do método de omissão (Mantovani et al., unpubl.), que calcula o polinômio que melhor se ajusta aos dados após eliminar as estações que definem a anomalia. Este método, aplicado com sucesso em vários exemplos de anomalias com características de corpos com geometria 3-D, no caso em questão, selecionou como representação do campo regional a superfície interpolada por 1441 pontos de medidas de um total de 86 estações na subárea de estudo. Os dados excluindo as estações com a componente gravitacional da alcalina de Ipanema, foram interpoladas através do polinômio robusto de grau 12, com 35 processos iterativos, resultando num desvio padrão final de 3 mGal, sendo a média dos resíduos de 2,0 mGal.

As estações eliminadas para fins do cálculo da regional estavam circunscritas à isonômala de -82 mGal, sobre o complexo alcalino de Ipanema. A escolha do valor limítrofe para a exclusão dos pontos neste processo leva em consideração vários ensaios que buscam minimizar a distorção para o menor número de pontos excluídos e, portanto, não é puramente subjetiva. O ajuste desses dados utilizou a regressão polinomial dada pela expressão $P(x,y) = A+Bx+Cy+Dxy$, cuja representação é feita numa malha regular de 350 colunas por 257 linhas (FIGURA 6). Subtraindo-se a componente regional da anomalia total (FIGURA 5), obtém-se a componente residual, que representa a contribuição gravimétrica dos corpos mais superficiais, no caso em questão, do complexo alcalino de Ipanema (FIGURA 7).

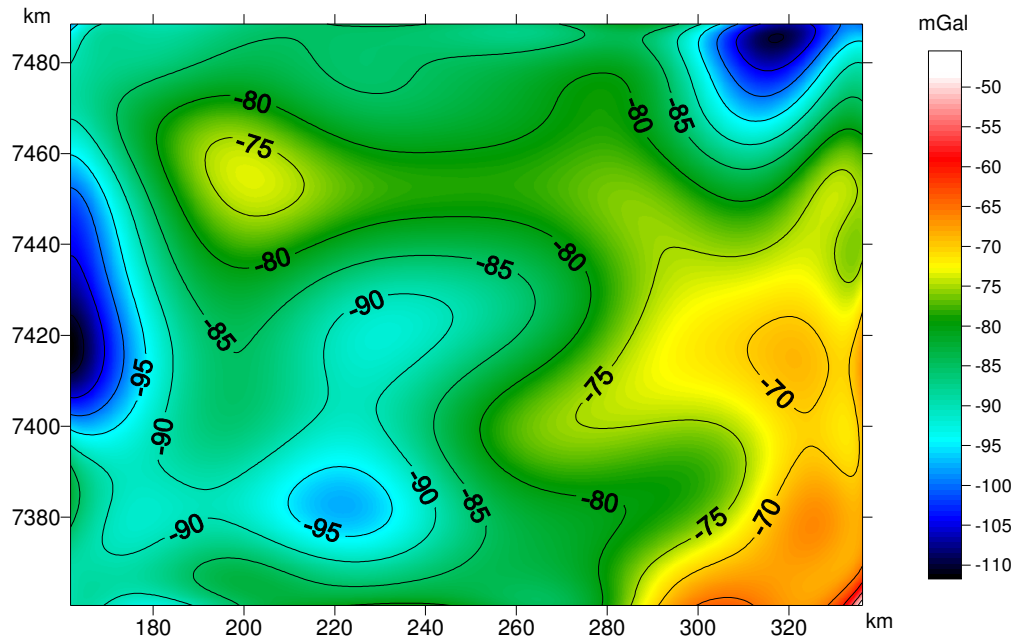


Figura 6. Representação polinomial robusto do campo gravimétrico regional na área de estudo. O polinômio $P(x,y)$ foi calculado interpolando-se os pontos de medida após eliminar aqueles sobre o corpo, circunscritos pela isoanômala de -82 mGal. A seleção da isoanômala na exclusão dos pontos para o cálculo do campo regional é descrita no texto.

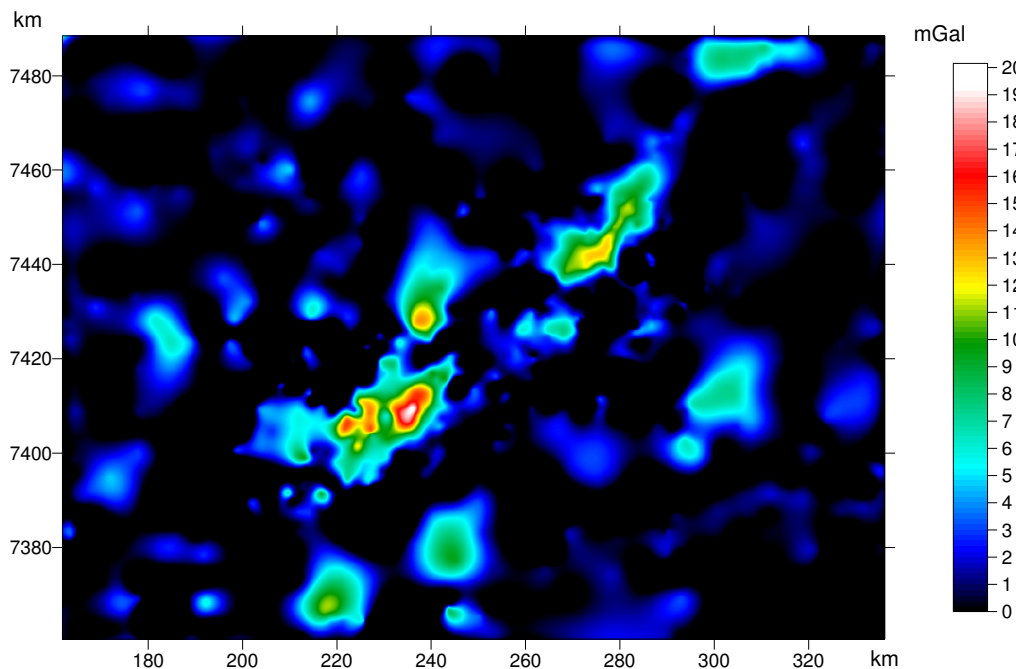


Figura 7. Representação do campo gravimétrico residual, que corresponde à contribuição gravimétrica devida à presença do complexo alcalino de Ipanema. Este residual é obtido subtraindo-se a matriz da FIGURA 6 daquela da FIGURA 5. A anomalia resultante é positiva e inclinada para NE-SW, acompanhando a direção da borda da Bacia do Paraná. O máximo valor é 19 mGal, sendo o efeito gravitacional de 4 mGal, próximo ao centro da anomalia, referente ao depósito de calcário.

Inserido no máximo valor anômalo da alcalina verifica-se um pequeno baixo gravimétrico, que coincide com a posição do depósito de calcário. A configuração do campo anômalo total é semelhante àquela já observada por Davino (1965; Figura 2), entretanto, com valores de magnitude diferentes. Ambas são caracterizadas por dois máximos. Os baixos anômalos observados são devido à presença de depósitos sedimentares, e os altos gravimétricos afastados da alcalina são devidos a intrusões de diabásio e derrames de basalto, notoriamente comuns na borda da bacia.

Modelagem dos dados e Resultados

Os levantamentos aeromagnéticos disponibilizados pela CPRM, mostram que a polaridade da anomalia residual de Ipanema é normal, assim como para os complexos alcalinos de Pariqueira Açú e Jacupiranga. O máximo gravimétrico da anomalia produzida por esse complexo é (19 mGal) superior ao de Pariqueira Açú (12 mGal). Estes complexos possuem tipos litológicos semelhantes, como exemplo, piroxênio, nefelina sienito, teralito, essexito, malignito e shonkinito entre outros. Em sua maior parte são rochas máficas ultrabásicas e básicas. Essas características são aqui utilizadas para atribuir um contraste de densidade entre o complexo e a encaixante, para fins de modelagem. Outra característica do campo gravitacional de Ipanema é seu alinhamento na direção NE-SW, enquanto que as demais possuem alinhamento na direção NW-SE, direção esta marcante no formato do seu alojamento.

Para fins de modelagem do complexo, em vista da característica da anomalia bem localizada, optou-se por utilizar programas que permite modelar um corpo com geometria tridimensional. A anomalia gravimétrica de Ipanema foi modelada com o programa IGMAS (GÖTZE & LAHMEYER, 1988) supondo um contraste de densidade de $0,65 \text{ g/cm}^3$. Isto equivale a considerar, por exemplo, um corpo homogêneo com densidade de $3,30 \text{ g/cm}^3$ e uma rocha encaixante de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Considerando as várias litologias citadas, a densidade do corpo intrusivo não se aplica para as componentes de glimerito e shonkinito; entretanto, esse valor é aqui utilizado para comparação com os modelos das rochas alcalinas vizinhas e que apresentam resposta gravimétrica positiva (Slavec et al., 2001; Rugenski et al. 2002). A densidade medida por Davino (1965) para o shonkinito pórfiro, de $2,79 \text{ g/cm}^3$, é equivalente aos valores de densidade medidos em laboratório para o presente estudo em amostras de shonkinito e malignito da alcalina de Pariqueira Açú, sendo $2,74 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ e $2,81 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ respectivamente.

Modelos com contrastes de densidade menores, ou seja considerando densidades inferiores a $3,30 \text{ g/cm}^3$ para o corpo mantendo-se a densidade da encaixante, terão profundidades maiores do modelo obtido (1,19 km). A massa calculada no modelo, não sofrerá mudanças significativas com essa variação na densidade, uma vez que ao se manter o mesmo ajuste, o volume do corpo aumentará ao se manter a massa constante.

Resultado do modelo tridimensional irregular

O campo resultante do modelo 3D de formato irregular é observado na Figura 8. O campo modelado apresenta boa correlação ao campo observado, tanto nos limites laterais como no máximo valor gravitacional.



3-D Gravity and Magnetic Modeling
Vers. 128/128

Anomaly Maps: Gravity

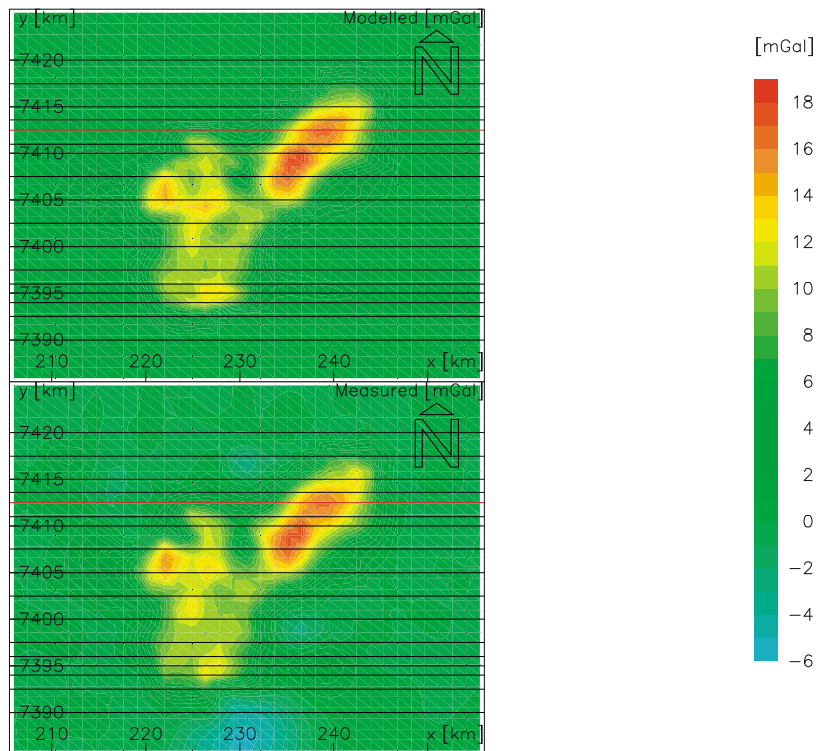


Figura 8. Campo anômalo Bouguer modelado através do programa IGMAS, para uma corpo de dimensões tridimensional (acima) e campo observado (abaixo).

A análise estatística do modelo é visualizada na Figura 9. Na mesma figura apresenta-se a diferença entre os campos observado e modelado em planta, com amplitudes variando entre 2 e 6 mGal. Essas diferenças resultam de heterogeneidades litológicas que não foram modeladas e de alterações da encaixante, sendo que apenas 2% dos dados têm magnitude superior a 2mGal. A correlação obtida é de 97% e a média dos resíduos tende a zero mGal. O modelo homogêneo aplicado satisfaz, portanto, as condições de validade.

O modelo em perfil de uma secção vertical que atravessa o corpo modelado orientada NE-SW e limitada entre os pontos A [247; 7420] e B [213; 7390] é apresentado na Figura 10. Observando a nítida separação de dois volumes na secção da Figura 10, poder-se-ia inferir a presença de dois corpos afins, ou de associações do corpo alcalino com glimerito e shonkinito.

O volume calculado para a intrusão alcalina de Ipanema para o modelo apresentado, com contraste de densidade entre o corpo e a rocha encaixante $\rho=0,35 \text{ g/cm}^3$, resulta em $1,62 \times 10^3 \text{ km}^3$. Para um valor de densidade atribuído à alcalina de $3,3 \text{ g/cm}^3$ a massa calculada é de $105,23 \times 10^{12} \text{ kg}$.

A representação da distribuição de profundidades em superfície para o modelo 3D é apresentada sob forma de mapa de isópacas (Figura 11). A máxima profundidade (1,19) km encontra-se em correspondência da coordenada (235; 7410) km, ocupando uma área restrita. A profundidade média para a base da intrusão é estimada em 600 m. Observa-se também a

separação em planta de dois blocos de rocha, como verificado na secção vertical da Figura 10.

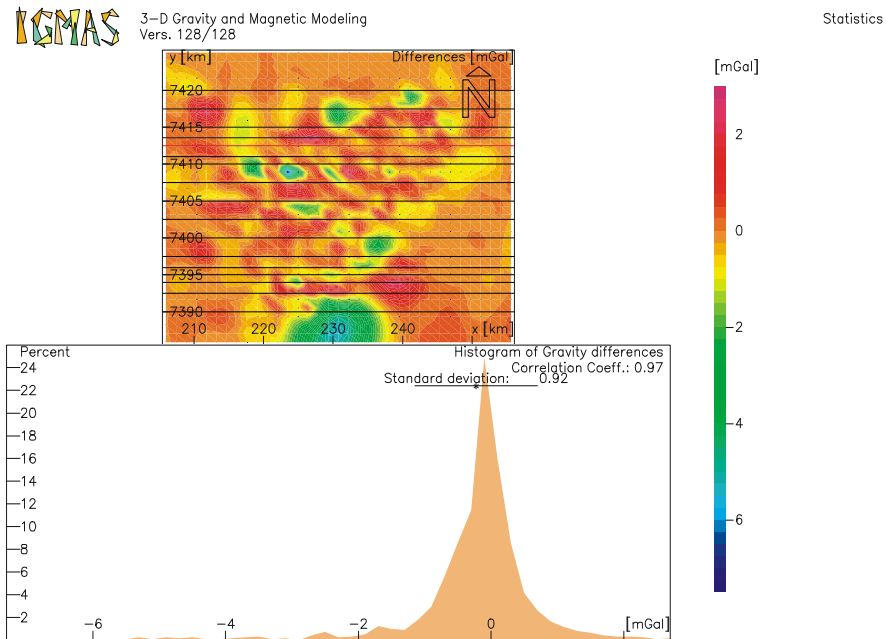


Figura 9. Análise estatística do campo gerado pelo modelo e campo observado. A correlação entre os campos é de 97%, com resíduos apresentando uma forte tendência de convergência para zero mGal.

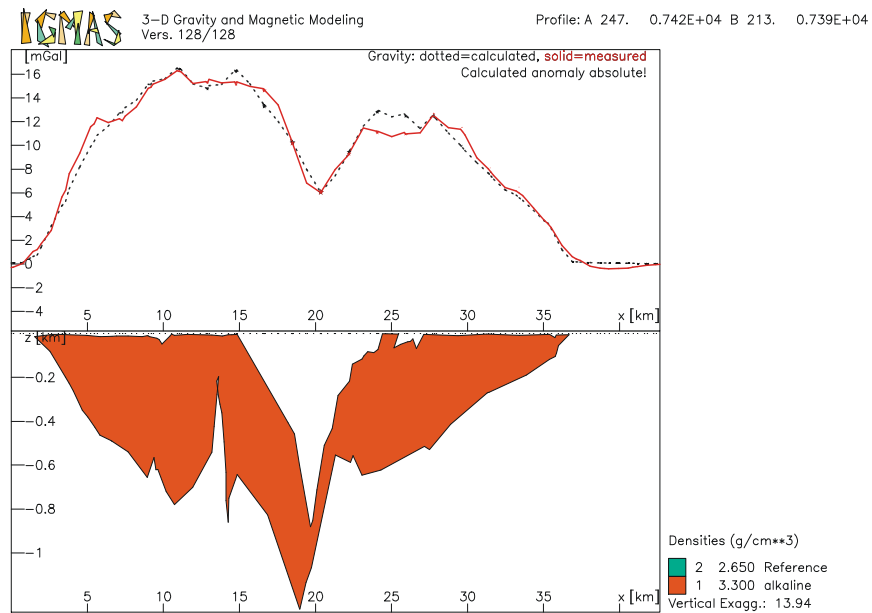


Figura 10. Perfil gravimétrico orientado de NE para SW, que atravessa o modelo ajustado. A linha contínua é o campo observado e a linha pontilhada o campo gerado pelo modelo. A máxima profundidade verificada é de 1,19 km.

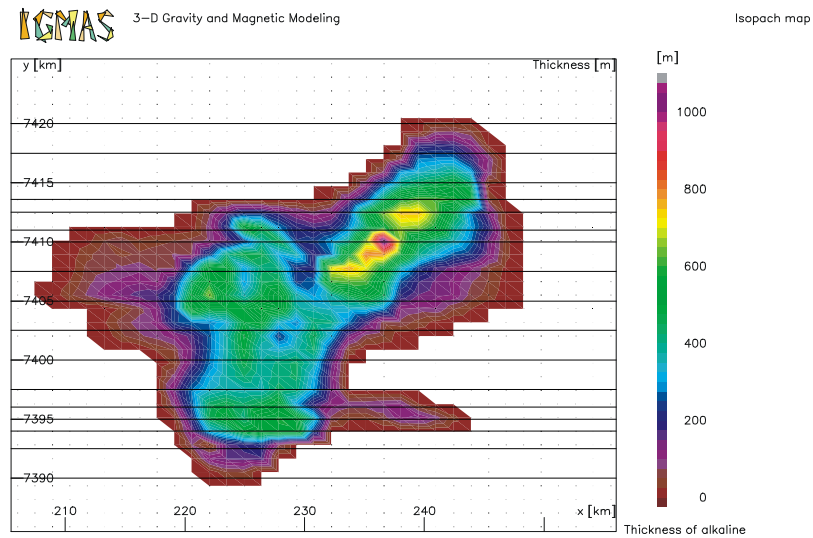


Figura 11. Mapa de isópacas do modelo

A distribuição de massa do modelo projetada em superfície é observada na Figura 12. A semelhança entre as duas figuras (11 e 12) não é casual uma vês que a distribuição da massa envolve a distribuição de profundidade associada ao valor atribuído de densidade em cada ponto. De outro lado, sua distribuição pode fornecer indicações quanto aos sítios e às direções preferenciais para a injeção dos magmas. No caso em estudo, a distribuição de massa apresenta-se alinhada aproximadamente na direção 60° NE, que coincide com aquela da borda da Bacia do Paraná na área; aproximadamente na mesma direção (N50E), observa-se a xistosidade das rochas metassedimentares. Além disso, as jazidas de magnetita e apatita estão alinhadas nessa mesma direção. Essa colinearidade (paralela ou transversal a 60° NE) pode indicar a direção preferencial para a exploração econômica de minérios associados ao complexo.

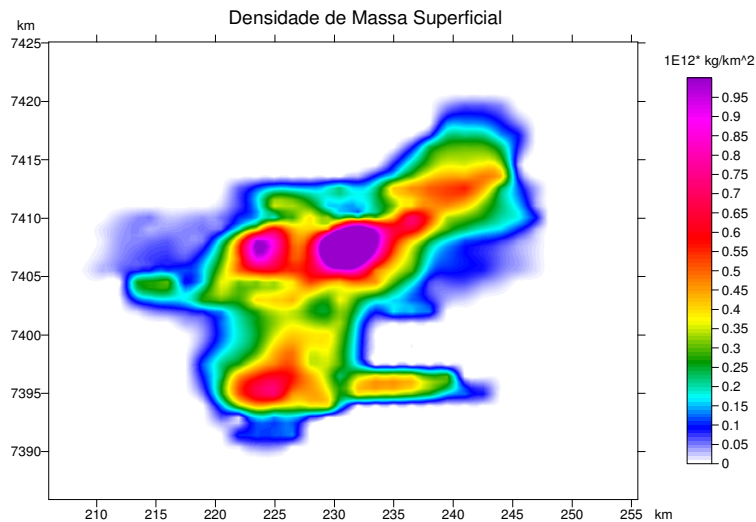


Figura 12. Mapa de distribuição de massa superficial. O eixo de centro de massa tem direção média de 60° NE.

A representação espacial do modelo 3D é apresentada na Figura 13. Sua geometria em sub-superfície é muito semelhante às demais alcalinas estudadas na área. Na imagem é visível a presença de diáclases (fraturas, juntas ou fendas no corpo da rocha alcalina sem deslocamento relativo das partes separadas), bem como, o seu formato irregular na base, não apresentando um único duto como nos demais casos. O modelo sugere que o alojamento tenha sido por injeção forçada, diante da não existência do duto principal e da sua reduzida profundidade. Essa afirmação condiz com a injeção forçada, uma vez que o duto original não foi preservado ao longo do tempo e o magma se alojou em substratos mais rasos onde os esforços envolvidos são menores.

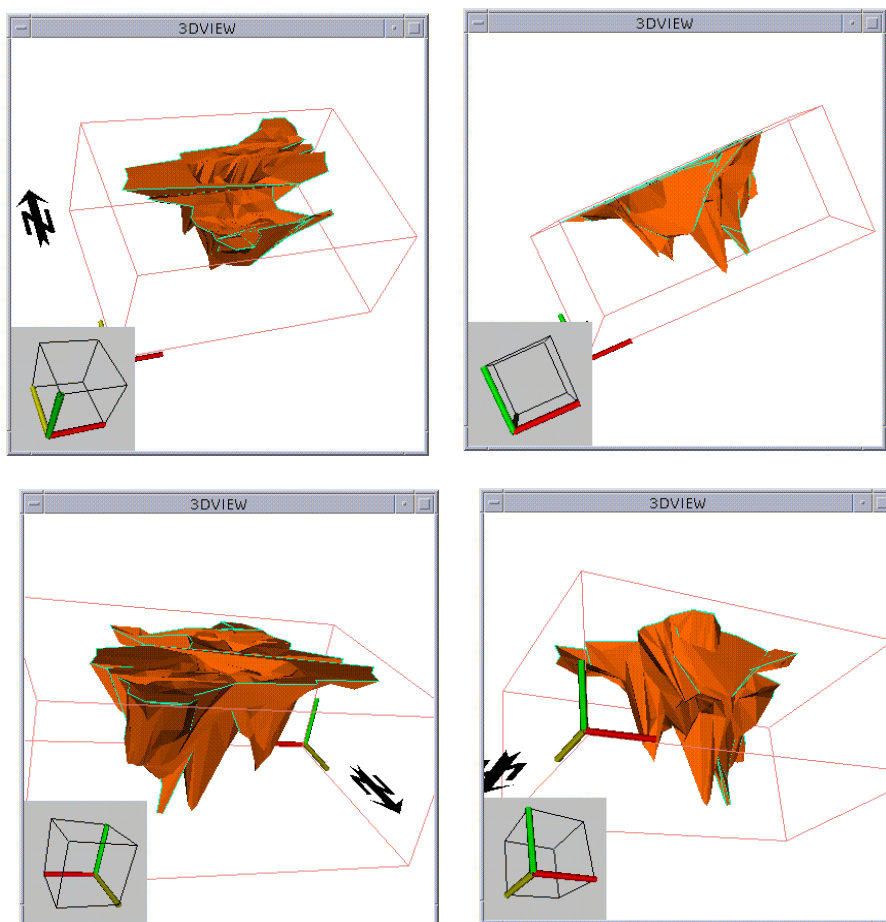


Figura 13. modelo tridimensional da alcalina de Ipanema para uma distribuição homogênea de densidade;

Agradecimentos

- CNPq – (verba)
- BUNGUE – (verba)
- IGMAS - (por contrato)

CPRM – (concessão de dados)

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA FILHO R. & PARADELLA W.R., 1976. Estudo do Maciço Alcalino do Poços de Caldas através de Imagens Landsat com Ênfase em Mineralizações Radioativas. Tese Mestrado. Relatório INPE 1112-TPT/065, 130p.
- ALMEIDA F.F.M., 1983. Relações tectônicas das Rochas Alcalinas Mesozóicas da Região Meridional da Plataforma Sul-Americana. Revista Brasileira de Geociências, vol. 13 p.139-158.
- AMARAL, G., et al., 1967. Potassium-argon ages of alkaline rocks from Southern Brasil. Geoch. Cosmoch. Acta, 31:117-142.
- AMARAL, G., BUSHEE, J., CORDANI, U.G., KAWASHITA, K. & REYNOLDS, J.H., 1967. Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. Geochim. Cosmochim. Acta, 31:117-142.
- 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). Journal of Petrology, vol. 33, part. 6, p. 1371-1404.
- COMIN-CHIARAMONTI & GOMES, C.B., 1995. Alkaline magmatism in central eastern Paraguay: Relationships with coeval magmatism in Brazil. Edusp, São Paulo, 1-458p.
- DAVINO, A., 1965. Estudos Geológicos e Geofísicos da Serra de Araçoiaba e Arredores, Estado de São Paulo. Universidade de São Paulo - USP. Tese de Doutorado FFLCH/USP.
- DELZIO, de L.M.J., 1991. Geologia e Aspectos Metalogenéticos do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Catalão II (GO). Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Instituto de Geociências – Campinas-SP, 1-101p.
- DERBY O.A., 1887. On Nepheline Rocks in Brasil, with Special Reference to the Association of Phonolite and Foyaite. Quaterly Journal of the Geological Society, 43:457-473.
- FUCK, R.A., 1972. Geologia do maciço de Tunas, Paraná, Brasil. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 82p.
- GASPAR, J.C., 1989. Geologie et mineralogie du complexe carbonatitique de Jacupiranga, Bresil. Unpublished PhD thesis, Universite d'Orleans.
- GOMES, C.B., BARBIERI, M., BECCALUVA, L., BROTZU, P., CONTE, A., GARBARINO, C., MACCIOTTA, G., MELLUSO, L., MORBIDELLI, L., RUBERTI, E., SCHEIBE, L.F., TAMURA, R.M., TRAVERSA, G., 1987. Petrological and Geochemical Studies of Alkaline Rocks From Brazil. 2. The Tunas Massif, State of Paraná. Geochimica Brasiliensis, 1(2): 201-234.
- GOMES, C.B., MORBIDELLI, L., RUBERTI, E., COMIN-CHIARAMONTI, P., 1987. Comparative Aspects Between Post-Palaeozoic Alkaline Rocks from the Western Margins of the Paraná Basin. Edusp/Fapesp, São Paulo, p. 249-274.
- GÖTZE, H.-J. and B. LAHMEYER, 1988: Application of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetics, Geophysics Vol. 53, No. 8, p. 1096 – 1108.
- KNECHT, T., (1930). Notas Geológicas sobre as Jazidas de Magnetita e Apatita de Ipanema. Secretaria Agricultura Industria e Comercio do Estado de São Paulo, 29 pp.
- LADEIRA, E.A., BRAUN, O.P.G., CARDOSO, R.N. & HASUI, Y., 1971. O cretáceo e, Minas Gerais, Anais XXV Congr. Bras. Geol., 1: 15-31, São Paulo.

- LIMA, P.R.A. dos S., 1976. Geologia dos maciços alcalinos do Estado do Rio de Janeiro. Parte I. Localização e geologia dos maciços. Semana de Estudos Geológicos. Univ. Fed. Rural Rio de Janeiro, Dep. Geociência, p. 205-245.
- MARIANO, A.N., MARCHETTO, M., 1991. Serra Negra and Salitre – Carbonatite Alkaline Igneous Complex. Fifth International Kimberlite Conference. Field Guide Book, Chapter 10, p. 75-79.
- MORAES, L. J., 1938. Jazidas de Apatita de Ipanema, Estado de São Paulo, Dep. Nac. Produção Mineral, Serv. Fom. Prod. Min., Bol. N° 27, 50pp. Rio de Janeiro.
- MORBIDELLI, L., GOMES, C.B., BECCALUVA, L., BROTZU, P., GARBARINO, C., RIFFEL, B.F., RUBERTI, E., TRAVERSA, G., 1997. Parental Magma Characterization of Salitre Cumulate Rocks (Alto Paranaíba Alkaline Province, Brazil) as Inferred from Mineralogical, Petrographic, and Geochemical Data. *International Geology Review*, Vol. 39, p. 723-743.
- MORBIDELLI, L., GOMES, C.B., BROTZU, P., ACQUARICA, S.D., GARBARINO, C., RUBERTI, E., TRAVERSA, G., 2000. The Pariquera Açú K- alkaline complex and southern Brazil lithospheric mantle source characteristics. *Journal of Asia Earth Sciences*, 18, p 129-150.
- QUINTAS, M.C.L., 1995. O Embasamento da Bacia do Paraná: Reconstrução Geofísica de seu Arcaboço. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, Departamento de Geofísica – IAG/USP, p. 1-213.
- PRICE, N.J., and COSGROVE, J.W., 1990. *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press, London. Pag. 60-88.
- ROSALES, M.J.T. & SHUKOWSKY, W., 1999. Caracterização Geofísica do Complexo Intrusivo Ultrabásico–Alcalino de Jacupiranga (S.P). Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, Departamento de Geofísica – IAG/USP, p. 1-120.
- SLAVEC, G. B., 2000. Resultados gravimétricos obtidos na região do complexo alcalino de Juquiá- SP. Trabalho de graduação II. Instituto Astronômico e Geofísico, IAG/USP.
- SLAVEC, G. B., 2002. Estudos Gravimétricos do Maciço Alcalinos de Poços de Caldas – MG/SP. Dissertação de Mestrado. Instituto Astronômico e Geofísico, IAG/USP.
- SØRENSEN, H., 1974. *The alkaline rocks*. Printed John Wiley & Sons, 1-622p..
- TOLEDO, G. M. C. & SOUZA, R. V., 1991. Estudo Preliminar da Alteração Intempérica das Rochas Ultramáficas Ricas em Apatita da Mina Gonzaga de Campos, Maciço Alcalino de Ipanema, SP. Congresso Brasileiro de Geoquímica – São Paulo, p. 91-94.
- ULBRICH, H.H.G.J., GOMES, C.B., 1981. Alkaline Rocks From Continental Brazil. *Eath-Science Reviews*, 17, p. 135-154.
- ULBRICH, H.H.G.J. & ULBRICH, M.N.C., 2000. The Lujavrite and Khibinite Bodies in the Poços de Caldas Alkaline Massif, Southeastern Brasil: A Structural and Petrographic Study. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4):615-622.
- VIGNERESSE, JL, 1995. Control of Granite Emplacement by Regional Deformation. *Tectonophysics*, 249 (3-4): 173-186.
- YILMAZ, O., 1989. *Seismic Data Processing*. Print Society of Exploration Geophysicists.

LEGENDA DAS FIGURAS

Figura 1. Mapa geológico do complexo alcalino de Ipanema (extraído de Toledo & Souza, 1991).

Figura 2. Mapa de anomalia Bouguer de Davino (1965). As isolinhas estão separadas a cada 2 mGal. A estrutura quase circular “cheia” representa a localização do afloramento alcalino. As estações são apresentadas pelas cruces.

Figura 3. Imagem da topografia da região de estudo, obtida com os dados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do projeto NASA/USGS. Observam-se claramente dois Domínios geológicos, sendo compostos pela Bacia do Paraná e embasamento. A região de contato entre os Domínios é indicada pela linha tracejada. A alcalina é visualizada pelo círculo (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

Figura 4. Os pontos representam as estações gravimétricas. A região selecionada indica a posição do complexo alcalino de Ipanema e proximidades.

Figura 5. Anomalia Bouguer da região de estudo. A anomalia da alcalina de Ipanema está indicada no mapa. Os pontos correspondem às estações de medida. Observa-se na parte oriental, em correspondência ao embasamento, uma tendência positiva, relativamente à porção da bacia, com exceção da anomalia localizada sobre o complexo alcalino.

Figura 6. Representação polinomial do campo gravimétrico regional na área de estudo. O polinômio $P(x,y)$ foi calculado interpolando-se os pontos de medida após eliminar aqueles sobre o corpo, circunscritos pela isoanômala de -82 mGal. A seleção da isoanômala na exclusão dos pontos para o cálculo do campo regional é descrita no texto.

Figura 7. Representação do campo gravimétrico residual, que corresponde à contribuição gravimétrica devida à presença do complexo alcalino de Ipanema. Este residual é obtido subtraindo-se a matriz da FIGURA 6 daquela da FIGURA 5. A anomalia resultante é positiva e inclinada para NE-SW, acompanhando a direção da borda da Bacia do Paraná. O máximo valor é 19 mGal, sendo o efeito gravitacional de 4 mGal, próximo ao centro da anomalia, referente ao depósito de calcário.

Figura 8. Campo anômalo Bouguer modelado através do programa IGMAS, para um corpo de dimensões tridimensionais (acima) e campo observado (abaixo).

Figura 9. Análise estatística do campo gerado pelo modelo e campo observado. A correlação entre os campos é de 97%, com resíduos apresentando uma forte tendência de convergência para zero mGal.

Figura 10. Perfil gravimétrico orientado de NE para SW, que atravessa o modelo ajustado. A linha contínua é o campo observado e a linha pontilhada o campo gerado pelo modelo. A máxima profundidade verificada é de 1,19 km.

Figura 11. Mapa de isópacas do modelo.

Figura 12. Mapa de distribuição de massa superficial. O eixo de centro de massa tem direção média de 60° NE.

Figura 13. Modelo tridimensional da alcalina de Ipanema para uma distribuição homogênea de densidade.