

9.1 Resumo

A gravimetria do maciço de Poços de Caldas foi estudada por Slavec, (2004), que efetuou um levantamento localizado na divisa entre os Estados de São Paulo e de Minas Gerais, SE do Brasil. O total de 783 estações gravimétricas, entre aquelas já existentes (IBGE/IAG) e novas implantadas para o propósito, foi utilizado no trabalho. Foram modelados com geometria 2,5 D quatro perfis que cruzam a região, e os resultados obtidos foram comparados com um modelo com geometria 3 D, para um corpo com geometria prismática de secção poligonal. Slavec (2004) obteve um volume de 7 220 km³, para uma raiz de 17 km, sendo que Ulbrich (1992), a partir de um formato cilíndrico chegou a estimativas da ordem de 8 000 e 9 600 km³.

No presente trabalho calculou-se o volume de Poços de Caldas através de um modelo gravimétrico com geometria irregular. O volume obtido foi de 8 200,7 km³ e massa de 1 021 600 M ton, para uma densidade modelada de 2,60 g/cm³ (densidade média do nefelina sienito), de um corpo homogêneo nas suas propriedades gravitacionais. Assim sendo Poços de Caldas foi modelado supondo um corpo composto basicamente por nefelina sienitos.

Algumas características relevantes foram estimadas quando do seu alojamento, relações estruturais, e a possibilidade de compensação hidrostática foi analisada. Essa análise quando verificada sobre um modelo 3D de formato irregular resulta em informações um pouco mais realísticas.

9.2 Introdução

O complexo alcalino de Poços de Caldas localiza-se no limite Sudeste dos Estados de São Paulo e Minas Gerais. A sua área aflorante de 800 km² proporciona a Poços de Caldas o título de maior intrusão alcalina do Brasil e a segunda em volume em termos mundiais, perdendo apenas para a intrusão de Khibina, na Rússia, com 1500 km². O primeiro artigo sobre o complexo é referente a Derby (1887), sendo um dos mais completos trabalhos, do ponto de vista geológico o de Ulbrich & Ulbrich (2000), e do ponto de vista geofísico o de Slavec, (2004). O presente trabalho utiliza o mesmo conjunto de dados de Slavec (2004), sendo apenas obtidas informações adicionais utilizadas na comparação com os demais complexos alcalinos.

O complexo é composto por tinguaitos e fonolitos, representando 80% dos afloramentos, e nefelina sienitos 17%. O restante 3% é formado por tufos, brechas e aglomerados com fragmentos de ankaritos. Os dados geocronológicos, K-Ar, indicam que a intrusão alojou-se no Cretáceo Superior (Amaral et al., 1967), onde amostras de ankaratritos apresentam idades de 87 Ma e diques de fonolitos do Cenozóico (época Paleogeno) com 53 Ma (Ulbrich & Ulbrich, 2000). A rocha encaixante, do Pré – Cambriano, é composta por fácies migmatitos do Grupo Pinhal. O mapa geológico do complexo alcalino é visualizado na Figura 9.1.

Poços de Caldas, do ponto de vista geofísico, inicialmente foi estudado através de métodos gamaespectrométricos, em meados do século passado. Com o advento da Guerra Fria, os dados objetivaram a localização de urânio para uso

bélico. As informações gravimétricas eram escassas em comparação a escala da intrusão, assim, com o intuito de densificar as medidas gravimétricas e apresentar um modelo representativo Slavec (2002) apresentou novos avanços.

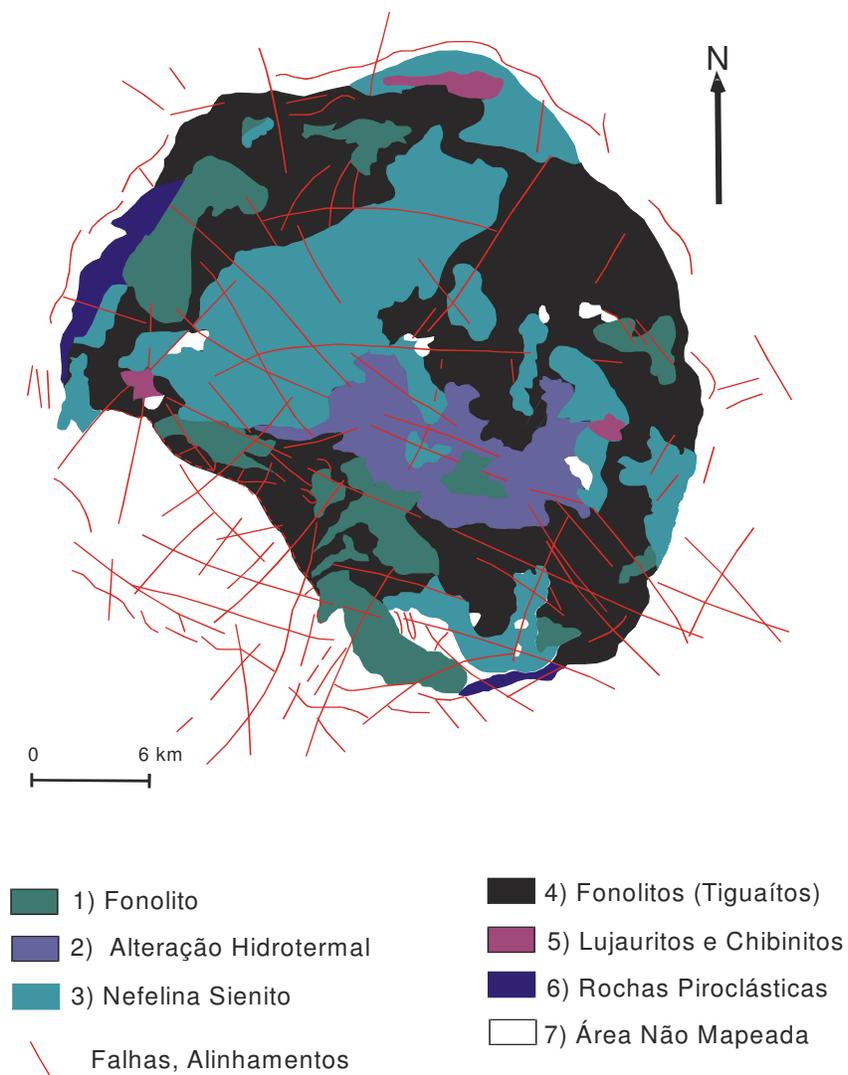


Figura 9.1. Mapa Geológico de Poços de Caldas. (extraído de Almeida & Paradella, 1976)

9.3 Gravimetria

Slavec (2002) foi, então, pioneira no estudo de Poços de Caldas do ponto de vista gravimétrico. As medidas de aceleração de gravidade g para fins de densificação na região de Poços de Caldas foram efetuadas com um gravímetro Lacoste & Romberg, modelo G, com realimentação eletrostática analógica e precisão de 0,04 mGal. Todas as medidas foram referidas à rede gravimétrica fundamental através da estação gravimétrica de Poços de Caldas (EG-504), sendo cada medida acompanhada de um erro experimental, propagado para o valor de g . O intervalo de estações de medidas foi de 500, dentro do corpo, e de 1000 m para caracterização do campo regional. O banco de dados utilizados por Slavec foi de 783 estações gravimétricas distribuídas por toda a área de estudo.

Paralelamente ao levantamento gravimétrico foram realizadas medidas de altimetria, pelo método de barometria, com a utilização de base fixa para controle da variação atmosférica. As medidas foram referidas à Rede de Nivelamento de 1ª ordem do IBGE. Como a região apresenta uma topografia acidentada e desníveis notáveis, os dados altimétricos foram utilizados em conjunto com mapas topográficos, para efetuar a correção de terreno, obtendo, assim, a anomalia Bouguer completa.

9.4 Modelos

Slavec (2002) confeccionou modelos 2.5D e 3D com formato irregular e prismático respectivamente. A máxima profundidade obtida, para uma densidade de $2,66 \text{ g/cm}^3$, foi de 17 km, com um volume de $7\,220 \text{ km}^3$. Esse volume foi estimado através de modelo 3D prismático de secção poligonal. No atual estágio

de pesquisa, devido à necessidade de estudar estruturalmente o complexo alcalino de Poços de Caldas, e levando em consideração que os modelos gravimétricos disponíveis não indicavam direções preferenciais, foi necessária a aplicação de um modelo 3D de formato irregular através do programa IGMAS (GÖTZE & Lahmeyer, 1998). O modelo aplicado determinou volumes um pouco mais próximos do valor estimado por Ulbrich (1984), no entanto, todos os modelos em media oscilam dentro do intervalo de 7 220 km³, 9 600 km³, sendo o de melhor ajuste de 8 200,7 km³.

O mapa anômalo Bouguer observado (à esquerda) e modelado (à direita) é visualizado na Figura 9.2. No modelo, obtido para uma densidade de 2,60 g/cm³ (densidade média do nefelina sienito) para um corpo homogêneo, o campo anômalo é representado com a forma semicircular e ovalada na direção NE/SW. A máxima amplitude da ordem de - 40 mGal, está localizada na porção nordeste do corpo, onde outro tipo litológico predominante é composto pelo tinguaito (rocha efusiva) e nefelina sienito (rocha plutônica). O sinal gravimétrico corresponde a um baixo anômalo, sendo resultante do contraste de densidades entre a rocha encaixante (migmatito) e a própria alcalina, nesse caso a encaixante possui densidade maior. O complexo de Juquiá é caracterizado por alto gravimétrico, e também está alojado em rochas metamórficas como Poços de Caldas, e portanto Juquiá possui uma densidade superior à da encaixante. Com isso é possível verificar que dependendo da rocha encaixante e da própria alcalina podem-se ter anomalias positivas, negativas ou nenhuma anomalia.

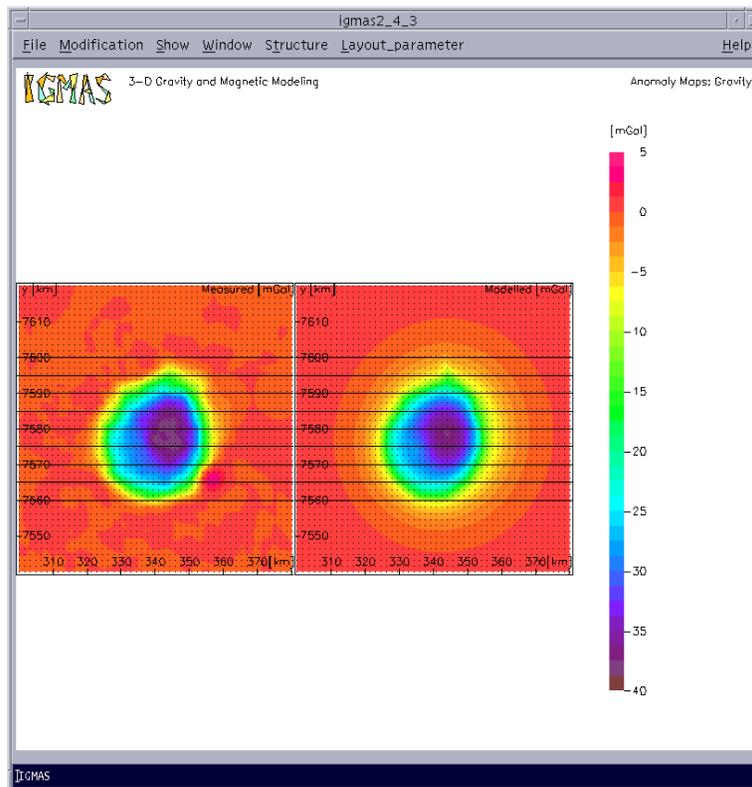


Figura 9.2. Anomalia Bouguer observada (à esquerda) e modelada (à direita). O campo modelado foi obtido através do modelo 3D de formato irregular.

A análise estatística do modelo 3D indica que 99% dos dados observados sobre o complexo alcalino se ajustam ao campo calculado, sendo o desvio padrão médio, obtido através dos resíduos, da ordem de 1,41 mGal. Apenas 2% dos dados possuem resíduos superiores a 2 mGal sendo o seu valor médio residual da ordem de -1 mGal. O valor anômalo de aproximadamente 9 mGal, localizado a Sudeste do complexo, configura-se numa estrutura externa à alcalina, não fazendo, portanto, parte dos tipos litológicos do complexo alcalino. (Figura 9.3)

Um perfil transversal à estrutura é observado na Figura 9.4, a sua posição está orientada de NE para SW. A porção mais profunda situa-se no setor NE do corpo, sendo sua cota da ordem de 50 km. Ao observar a figura verifica-se que a maior parte do complexo não ultrapassa 30 km de profundidade. A cota de 50 km pode ser interpretada como o duto que conectou a base da crosta até a superfície, permitindo a ascensão do magma alcalino, bem como a formação das efusivas que compõem Poços de Caldas.

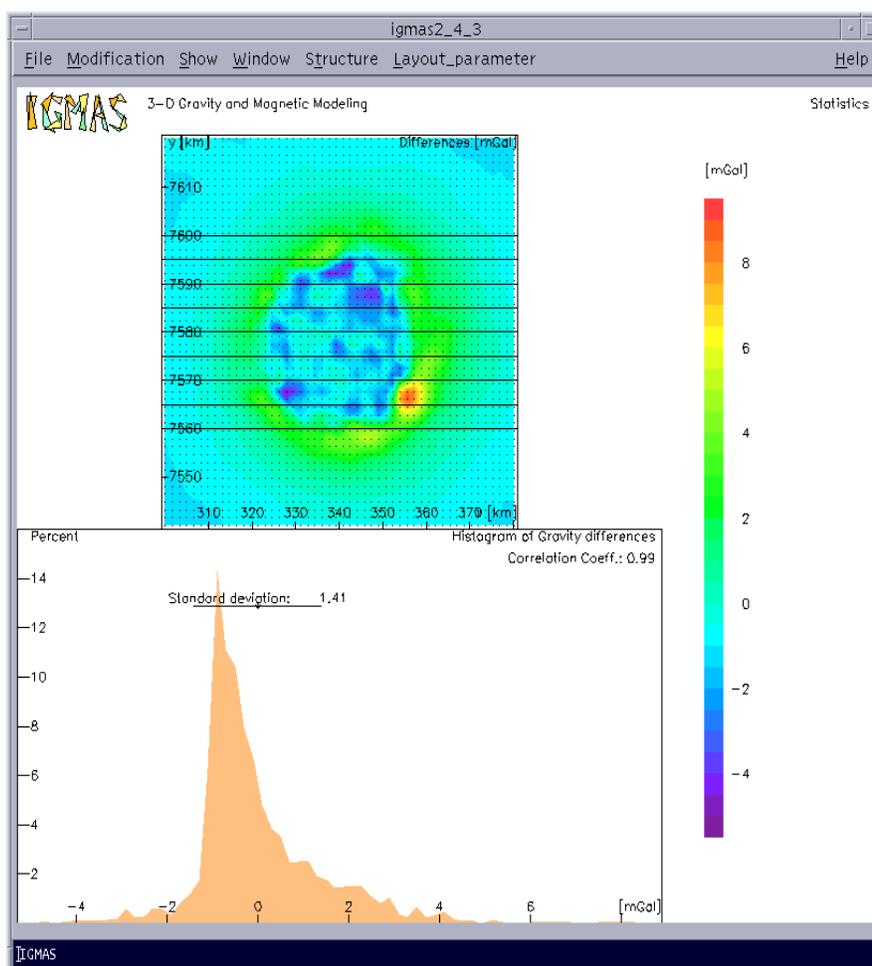


Figura 9.3. Análise estatística do modelo 3D de Poços de Caldas.

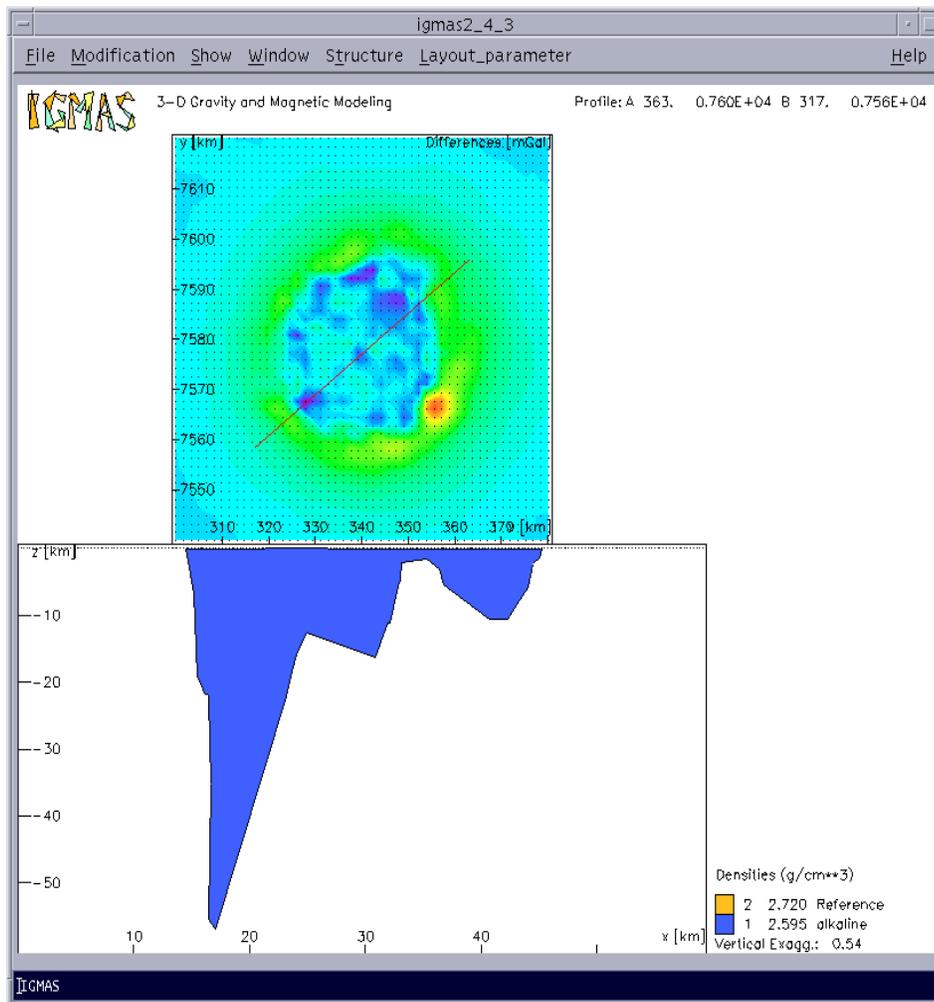


Figura 9.4. Perfil gravimétrico obtido através do modelo 3D irregular. A sua posição está orientada de NE para SW, vide mapa residual na porção superior ao perfil.

O mapa de densidade de massa superficial (Figura 9.5) não apresenta nenhum alinhamento de massa que possa ser interpretado como condicionamento tectônico. São verificadas duas concentrações de massa no setor leste do complexo, 1° e 4° quadrantes, com formato semicircular, que sugerem

alojamentos por diapirismo, talvez correspondendo a alojamentos em diferentes períodos.

Levando em consideração os processos de diapirismo e a massa existente no local, necessariamente a intrusão deveria ter deslocado grandes volumes de massa da rocha encaixante formando domeamentos, tanto na parte superior como nas laterais. Os esforços laterais de tração são necessários para ocorrer o alojamento do corpo, desde que parte da rocha encaixante não tenha sido anexada ao corpo através da re-fusão. Porém, não se observam grandes domeamentos *in situ*, quando verificada a atual topografia (Figura 9.6.a); e como os tipos litológicos presentes nas camadas superiores da alcalina são tipos efusivos, é de se esperar que Poços de Caldas tenha sido uma caldeira com presença de lavas. O volume de rocha encaixante deformada para o alojamento de Poços de Caldas pode ter tido um intenso transporte por erosão.

Na Figura 9.6.b, além de Poços de Caldas que se configura num baixo gravimétrico com formato semicircular, nota-se a norte da alcalina dois altos anômalos com cotas superiores a 80 mGal separados por uma faixa de formato convexo que é constituído por baixo gravimétrico e prolonga-se até ao sul de Poços de Caldas. Os altos anômalos, ao redor da intrusão alcalina, correspondem a gnaisses e granulitos do complexo Varginha-Guaxupé, sendo datado do Arqueano. Os mesmos, no mapa Bouguer regional, parecem ter sido separados estruturalmente talvez por um sistema de falhas e empurrões (faixa convexa, N-S). Além disso, as duas maiores concentrações de massa, em Poços, estão posicionadas na porção referente ao prolongamento dessa faixa na intrusão.

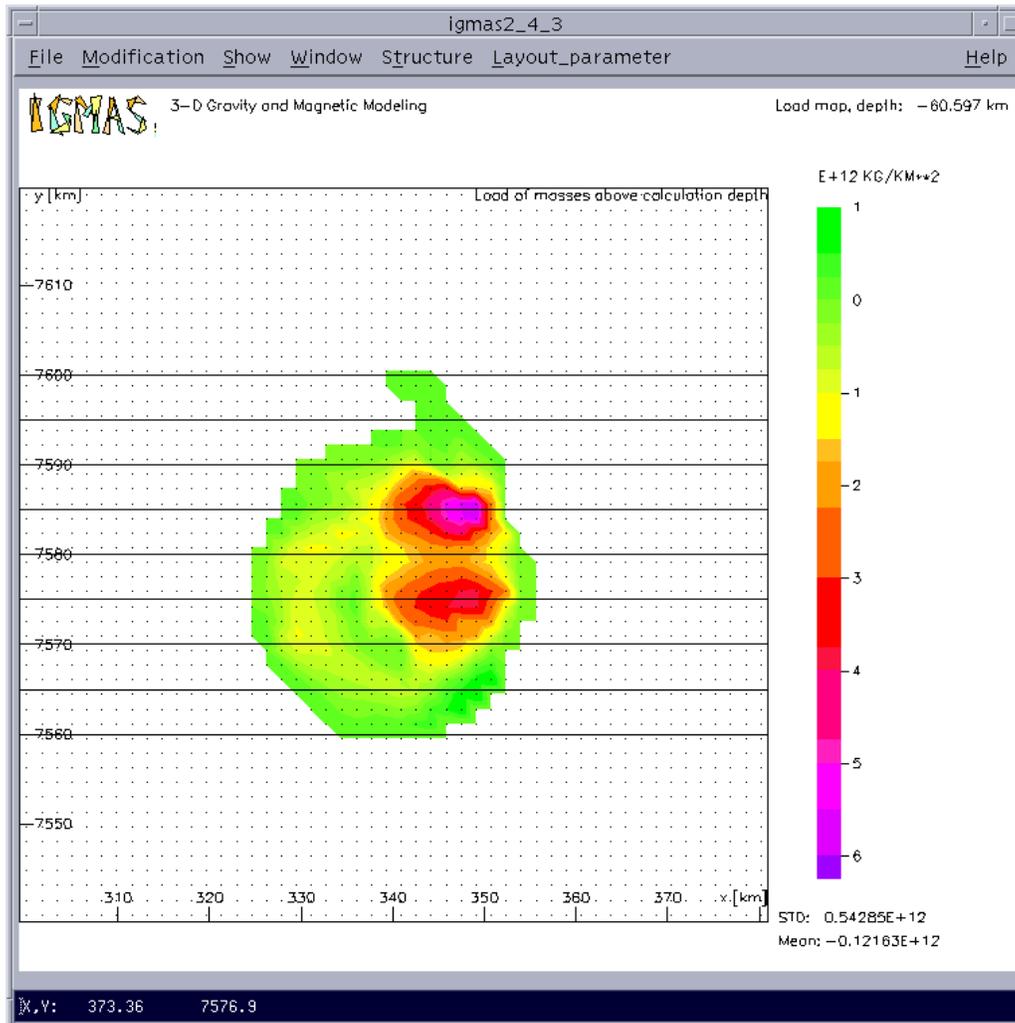


Figura 9.5. Mapa de distribuição de massa superficial.

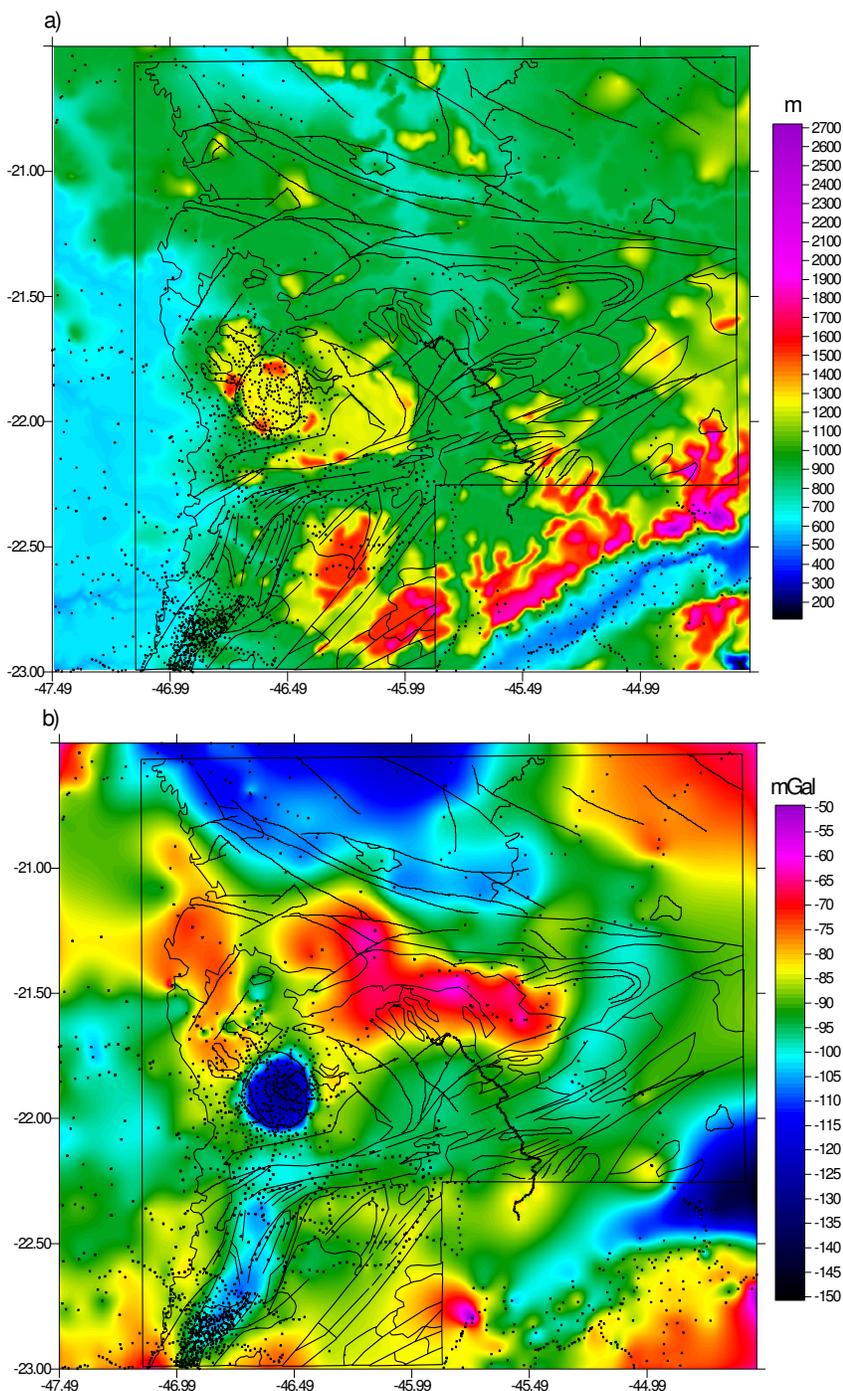


Figura 9.6. Na imagem a) são observados os dados topográficos do SRTM; b) anomalia Bouguer em escala Regional. A estrutura circular correspondendo ao baixo anômalo gravimétrico é Poços de Caldas. As linhas na cor preta são os contatos geológicos, alinhamentos ou falhas, e os pontos na cor preta as estações gravimétricas.

A imagem tridimensional de Poços de Caldas (Figura 9.7) é semelhante aos demais complexos alcalinos, sendo formados por secções de maior área próximo da superfície e apresentando tendência de afinamento com o aumento da profundidade. O volume estimado foi de 8.200,7 km³ e massa de 1.021.600 Mton.

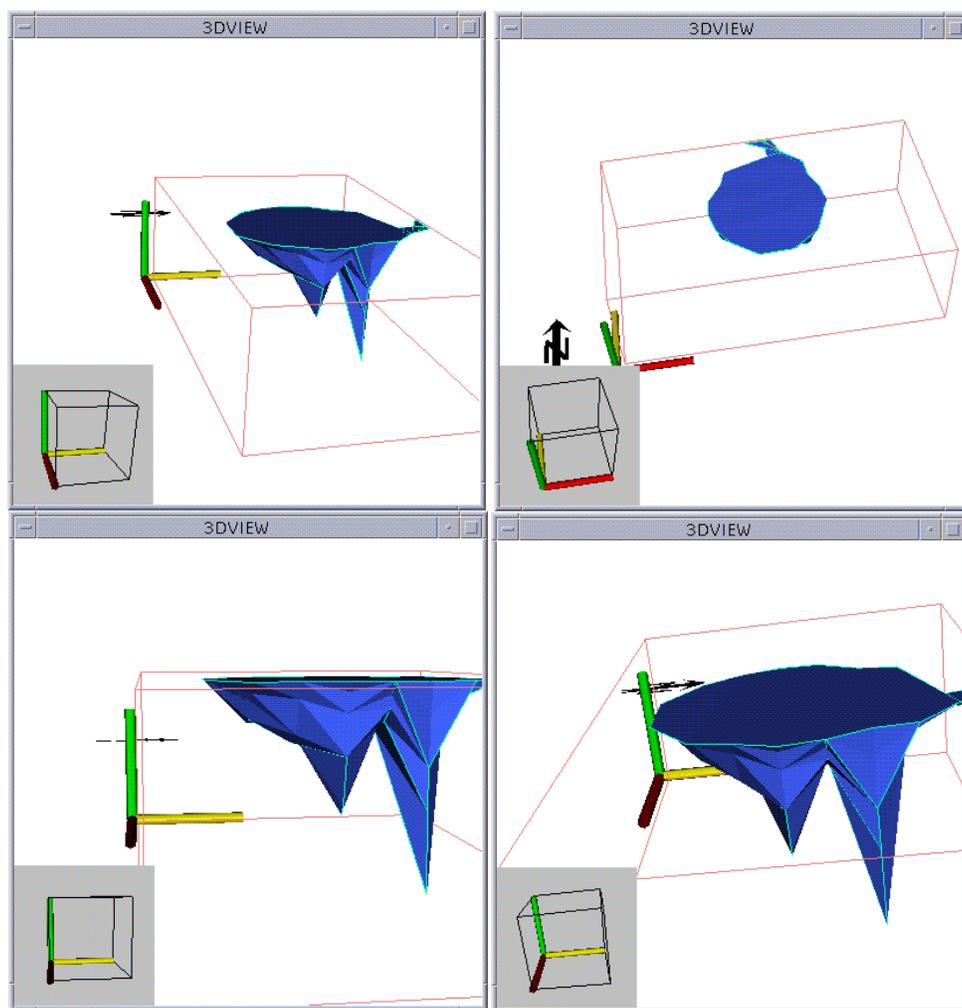


Figura 9.7. Imagem tridimensional de Poços de Caldas.

9.4 Análise Hidrostática

Os produtos obtidos através da modelagem 3D, massa e volume, podem ser utilizados na determinação de outros parâmetros de interesse físico. Dentre os parâmetros pode-se citar como exemplo, o peso que a alcalina exerce na litosfera, empuxo, e tempo de resfriamento do complexo. Desde que o complexo não esteja em equilíbrio hidrostático é possível inferir simulações de movimentos, caso existam, e da sua energia dispersa no meio, que resulta do seu movimento na litosfera.

Tomando-se em particular o complexo alcalino de Poços de Caldas, foram determinadas a força peso e o empuxo. O cálculo da força peso (**P**) é obtido numericamente através de infinitésimos da força peso (**dP**). Cada infinitésimo **dPg**, obtido através do modelo gravimétrico, é calculado como segue.

Através do mapa de distribuição de massa em superfície (kg/m^2) (Figura 9.8), ou seja, da densidade de massa superficial (**dMs**), um resultado da modelagem 3D do campo anômalo Bouguer residual, obtém-se infinitésimos de massa (**dM**) para cada célula da malha:

$$dM = dMs \cdot dx \cdot dy \quad (1)$$

com o cálculo de dM, os infinitésimos de peso são obtidos multiplicando-se pela aceleração da gravidade ($9,8 \text{ m/s}^2$).

$$dPg = dM \cdot |\vec{g}| \quad (2)$$

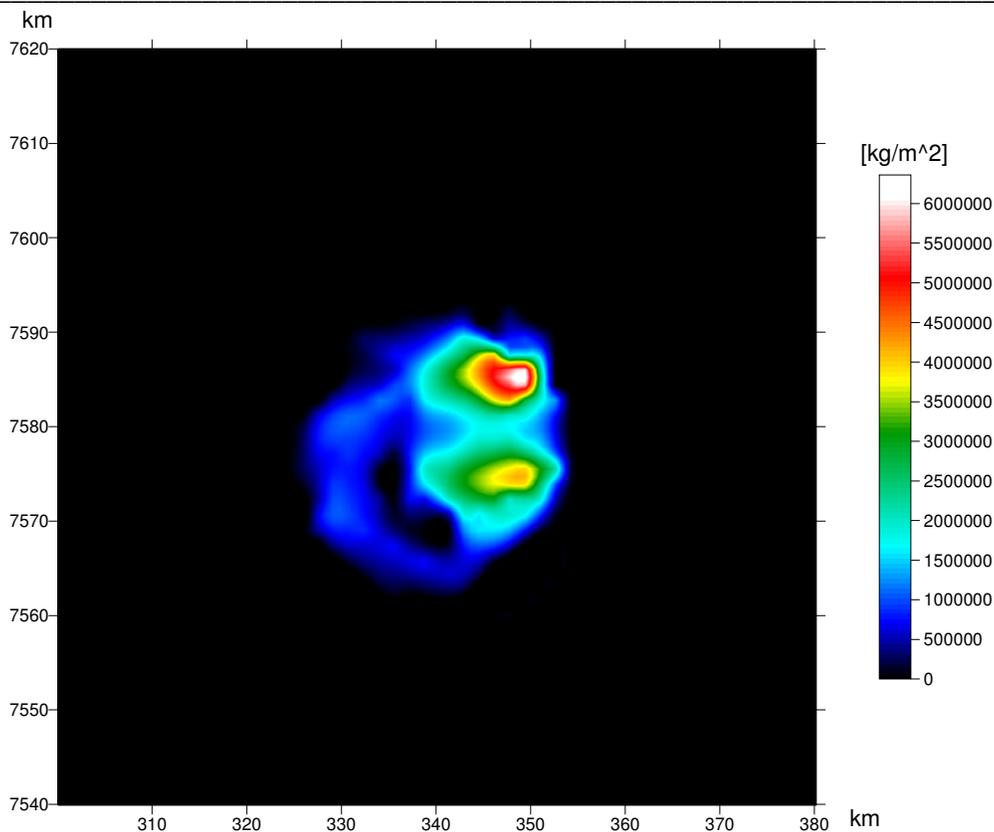


Figura 9.8. Distribuição de massa superficial

Na Figura 9.9 observa-se o mapa com os infinitésimos da força peso em planta. No entanto, essa força peso não leva em consideração o peso proveniente da topografia. Isso se deve ao uso do campo anômalo Bouguer, como dado de entrada na modelagem 3D, ser uma anomalia na qual o efeito gravitacional das massas topográficas é subtraído da anomalia gravitacional. Assim para obter o peso resultante do complexo alcalino é necessário somar vetorialmente o peso do modelo e o peso da porção da alcalina, que esta acima do nível médio do mar, ou seja o edifício vulcânico. Com isso, é obtido o peso total.

O peso do edifício vulcânico (Figura 9.10), que está acima do nível do mar, é determinado através do modelo digital da topografia do complexo alcalino, ou

seja, todo o relevo ao redor do complexo deve ser desconsiderado para o cálculo. Para essa determinação foram usados os dados do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission; NASA, 2000), sendo o tamanho da malha digital o mesmo usado no cálculo da densidade de massa superficial. Ou seja, o modelo digital da topografia é transformado em prismas com unidades de volume, sendo a altura do prisma equivalente à altitude da superfície topográfica e a área da base, o produto dos intervalos de amostragem nas coordenadas x e y. Com o volume de cada prisma e conhecendo a densidade da topografia, no caso a da rocha alcalina ($2,59 \text{ g/cm}^3$), calcula-se a massa de cada prisma, sendo posteriormente calculado o peso.

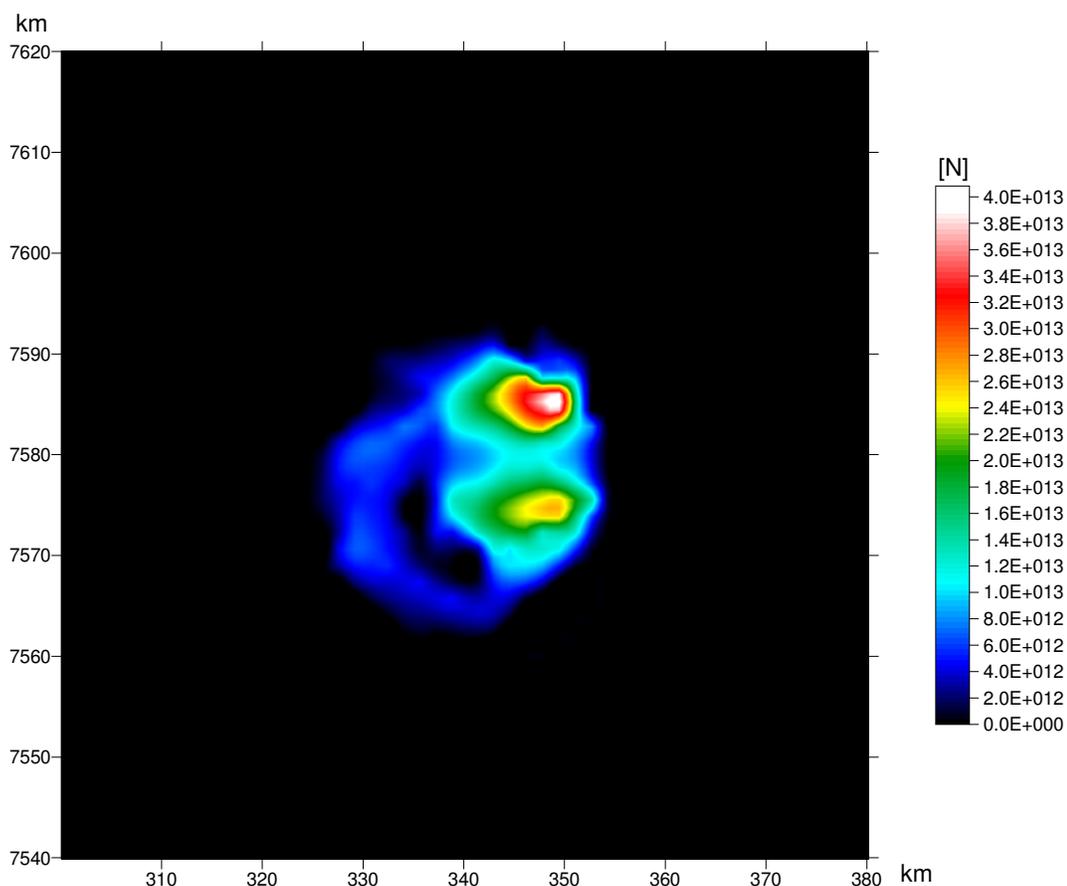


Figura 9.9. Peso da alcalina sem correção e sem o peso da topografia

Uma correção que deve ser levada em consideração no cálculo do peso total é o excesso de massa que é retirado ou adicionado ao modelo gravimétrico pela correção Bouguer (Figura 9.11). Isso ocorre porque na correção é utilizada uma densidade de $2,67 \text{ g/cm}^3$ para o platô Bouguer, sendo seu efeito gravitacional subtraído para todas as estações de medida, sejam essas medidas referentes à rocha encaixante ou à rocha objeto de estudo. Esse contrapeso deve ser somado ou subtraído, dependendo do contraste de densidade, ao peso da topografia e do complexo alcalino, obtidos através do modelo gravimétrico.

Matematicamente podemos escrever da seguinte forma a determinação do peso total da alcalina (**dP**), Figura 9.12, como sendo a soma do peso topográfico (**dPt**); peso calculado através da gravimetria (**dPg**) e a correção do peso oriundo do excesso de massa retirado pela correção Bouguer (**dPc**):

$$dP = dPt + dPg \pm dPc , \quad (3)$$

onde **dPc** é:

$$dPc = \Delta\rho \cdot dx \cdot dy \cdot h , \quad (4)$$

sendo $\Delta\rho$ o contraste de densidade, **dx** e **dy**, os intervalos de amostragem e **h** a altitude da superfície topográfica. Caso a anomalia do corpo estudado seja negativa, a componente **dPc** deve ser somada aos pesos, e caso seja positiva, é necessário efetuar a subtração.

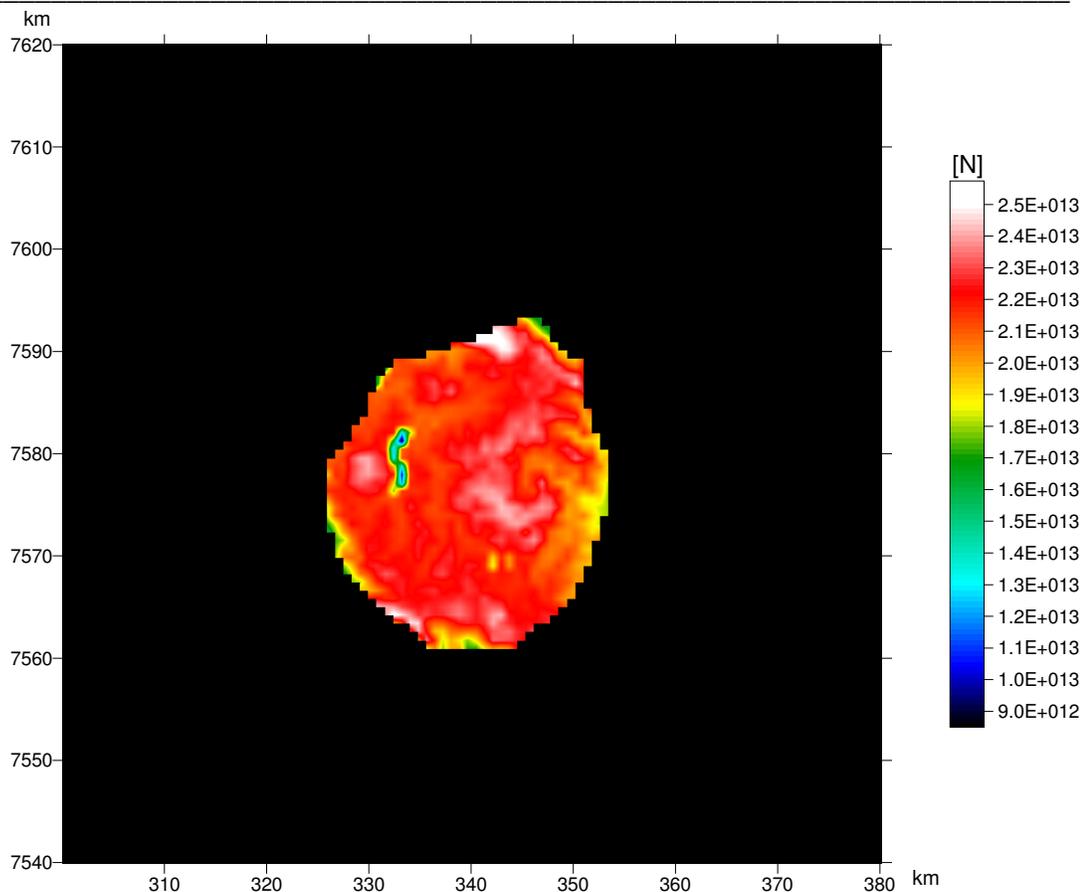


Figura 9.10. Peso da topografia do complexo alcalino.

Após a determinação do peso exercido pelo complexo na litosfera é necessário obter o empuxo exercido pela crosta na porção “submersa” do corpo que não aflora. O empuxo é calculado através do mapa de isópacas de profundidade do modelo (Figura 9.13).

Com a determinação dos limites do modelo em profundidade o empuxo (**E**) é calculado da seguinte forma:

$$\mathbf{E} = \rho_c \cdot |\vec{g}| \cdot \mathbf{h} \quad (5)$$

sendo ρ_c a densidade da crosta, 2,67 g/cm³;

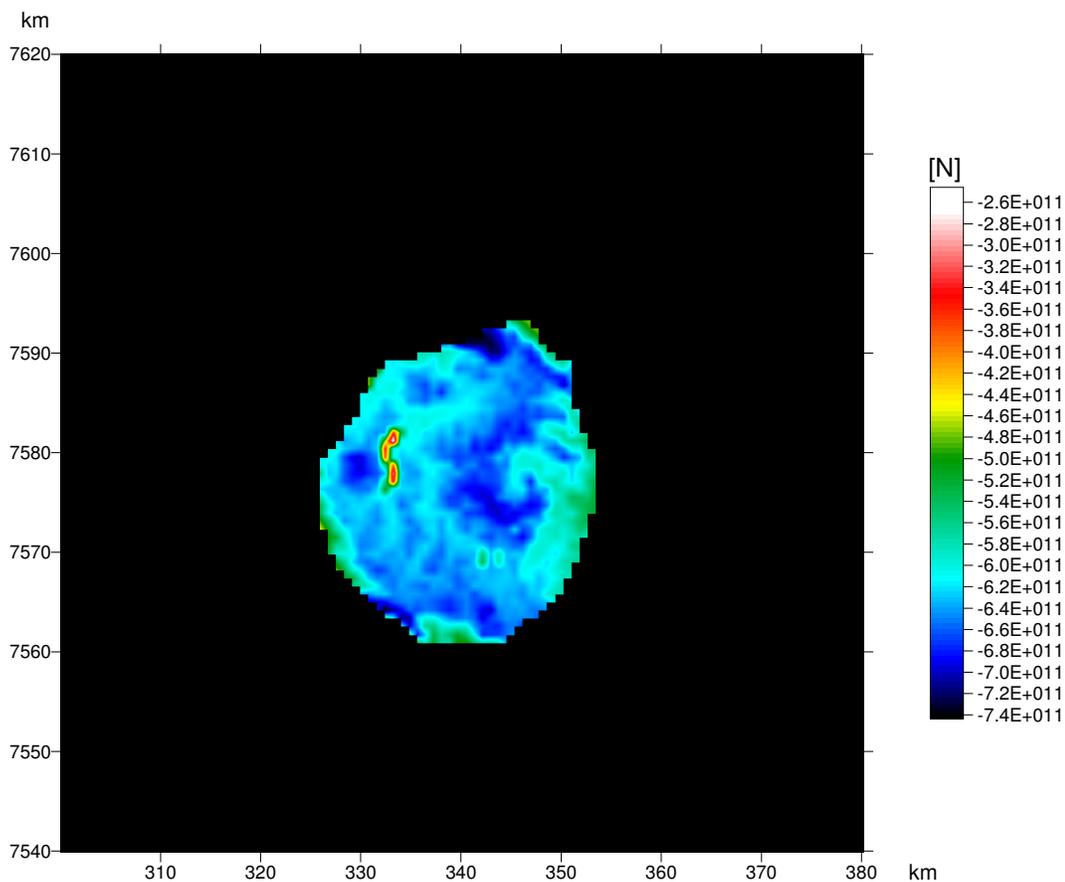


Figura 9.11. Correção do peso devido ao excesso de massa retirada na anomalia Bouguer. Deve-se notar que a correção para o exemplo em questão é de duas casas decimais, inferior ao peso da topografia, configurando-se numa pequena correção dos valores.

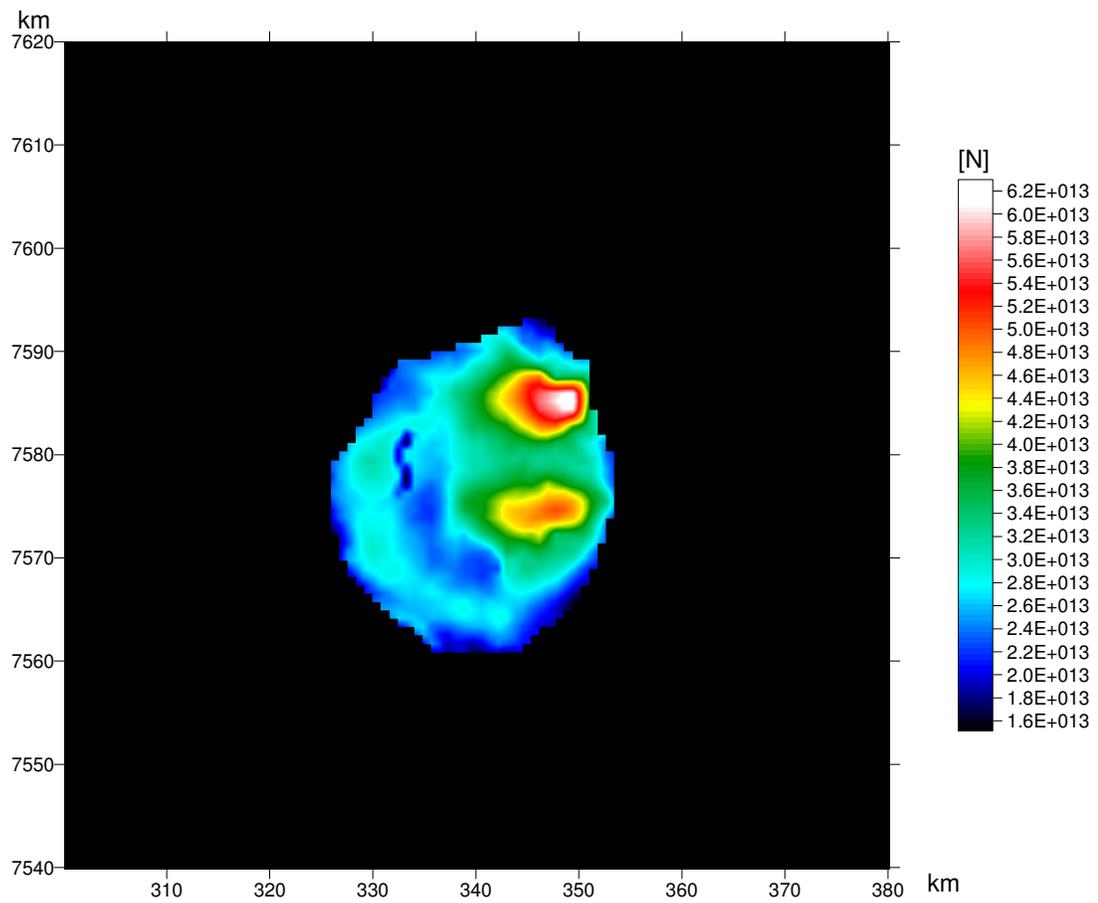


Figura 9.12. Peso total da alcalina

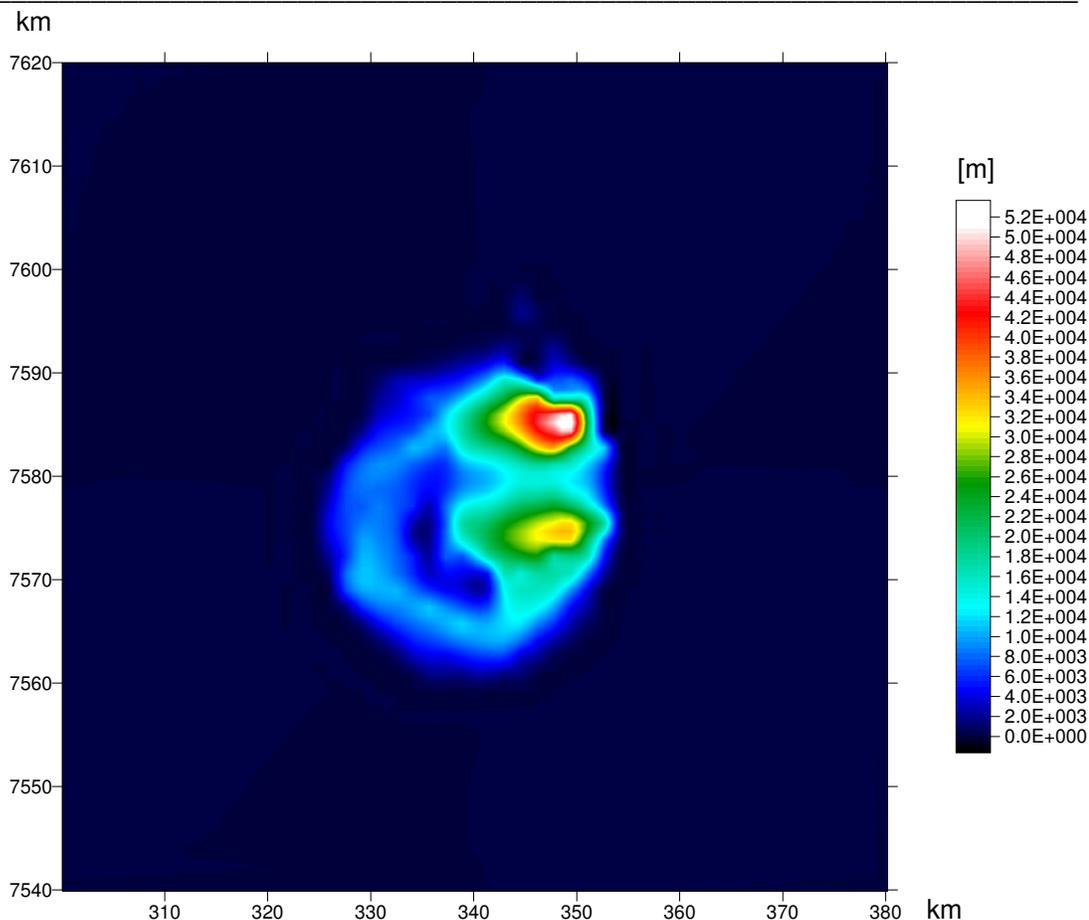


Figura 9.13. Mapa de isópacas do modelo 3D, que representa as profundidades limitantes do modelo.

Na Figura 9.14 é observado o empuxo. Comparando com a força peso do complexo alcalino, é verificado que o empuxo tem magnitude superior, assim sendo, a força resultante (\mathbf{Fr}) não é nula, apresentando uma componente de deslocamento, na direção contrária à da aceleração da gravidade. Essa hipótese se respalda nos registros geológicos que indicam um intenso fraturamento dentro do complexo alcalino. A existência de deslocamentos, que necessariamente deve ter uma escala de movimento ínfimo, quase nulo, possivelmente apresenta uma ordem muito inferior a 1 mm ano, caso contrário às províncias alcalinas, seriam

áreas de grande atividade sísmica, com magnitudes elevadas, supondo uma crosta rígida, ou seja, desconsiderando sua deformação. No entanto, mesmo assim, são verificadas algumas ocorrências sísmicas nas proximidades dos complexos alcalinos (Figura 9.15). A hipótese do movimento quase nulo, parte do princípio que necessariamente tem que existir uma força contrária à força de empuxo. Essa força tem que ser necessariamente restauradora, para equilibrar o sistema; mas como é essa força e como ela atua de forma de frear o movimento do corpo?

A crosta no tempo geológico não tem um comportamento rígido mais sim dúctil, esse comportamento é facilmente observado nas rochas metamórficas através das xistosidades, principalmente nas fácies de alto grau metamórfico. Logo podemos considerar a crosta como um meio reológico e assumir que a força restauradora necessária para frear o movimento é a força de atrito viscoso (**F_{at}**) para movimento laminar.

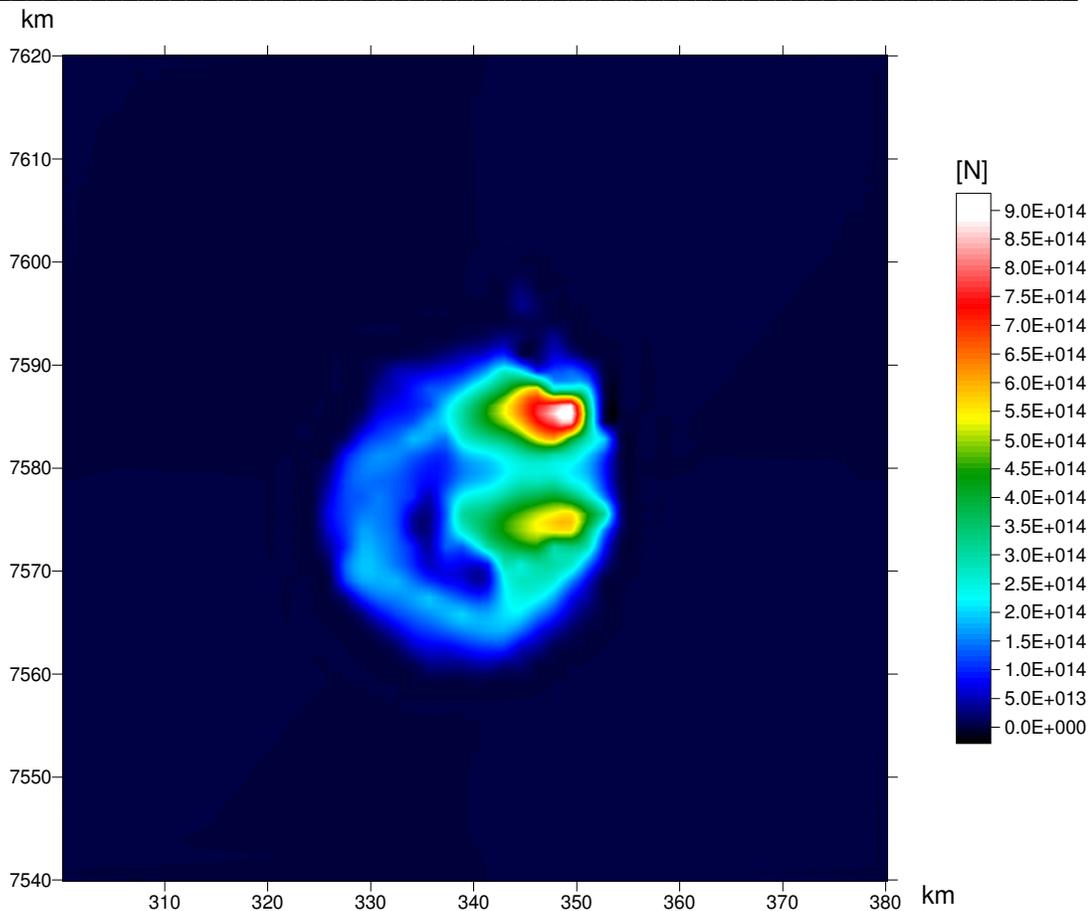


Figura 9.14. Empuxo resultante da crosta exercida sobre a alcalina.

Assim podemos escrever:

$$\mathbf{Fr} = \mathbf{P} - \mathbf{E} \quad (6)$$

como $\mathbf{Fr} \neq \vec{0}$ mas o movimento é \approx nulo, temos que a força resultante (**FR**)

final deve ser:

$$\mathbf{FR} = \mathbf{Fr} - \mathbf{Fat} \quad (7)$$

onde

$$\mathbf{Fat} = 6\pi \cdot \eta \cdot \mathbf{r} \cdot |\vec{v}| \quad (8)$$

sendo

η a viscosidade do meio (crosta), r o raio supondo uma esfera, $|\vec{v}|$ a velocidade de movimento do complexo. Como r é um parâmetro geométrico e os complexos possuem formato semelhante a um cone, seu valor é determinado através da equivalência de volumes de um cone com uma esfera, na realidade o volume do cone é a do próprio volume obtido através do modelo gravimétrico. Assim sendo, o raio r é obtido através da suposição de que o cone apresenta volume igual ao de uma esfera imaginária. Logo, para Poços de Caldas temos um volume (V) igual a **8 200,7 109 m³**, e um raio r igual a **12 509,91 m**, já que:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4\pi}} \quad (9)$$

Analisando a **Fat** verificamos que necessariamente deve haver o movimento do corpo para que ela exista. Caso a velocidade seja nula a **Fat** deixa de existir, e a instabilidade no movimento do corpo se torna exagerado e irreal, já que como mencionado anteriormente, as províncias alcalinas não são áreas de risco sísmico. Observando a equação (7) e levando em consideração que o movimento do corpo é próximo de zero, podemos assumir que o corpo descreva um movimento uniforme, ou seja, a sua aceleração é nula, sendo sua velocidade constante. Para **FR** ser estritamente nula num movimento uniformemente variado deve atuar uma outra força no sistema.

A força **Fat** é uma força devido ao atrito da parede do corpo com o meio viscoso ao redor, portanto com o movimento deve existir a dissipação de energia. Ao redor dos complexos alcalinos geralmente se encontram águas térmicas; uma pergunta que cabe nessa etapa de pensamento é se essa água é aquecida pela

liberação de energia devido ao movimento do corpo, que gera trabalho e consequentemente dissipação de energia térmica, e qual seria a massa de água necessária para a energia dissipada aquecer em 50°C? Para responder essa pergunta é necessário transformar a **Fat** em trabalho (**W**), e supor que **FR** é zero. O trabalho é obtido através do produto escalar da **Fat** com o deslocamento **d**. Assim temos.

$$\mathbf{W} = \mathbf{Fat} \cdot \mathbf{d} \quad (10)$$

Resulta em:

$$\mathbf{Fat} = \mathbf{Fr} \quad (11)$$

para $\mathbf{FR} = \vec{0}$;

Portanto **Fat** pode ser obtida numericamente através de **Fr**. O trabalho **W** é calculado através de:

$$\mathbf{W} = \sum_{i=1}^N \mathbf{dFat} \cdot \mathbf{d} \quad (12)$$

onde **dFat** são os infinitésimos da força de atrito.

Como exemplo calculamos o caso de Poços de Caldas para um movimento de **d** igual a 1mm/ano ($\mathbf{d} = 3,16 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$), resultando em **W** igual a $2,18 \cdot 10^{14} \text{ J}$.

Para um movimento de 1mm/ano e utilizando a equação 8, obtemos a estimativa da viscosidade da crosta. Sendo a força de atrito $\mathbf{Fat} = 0,6898 \cdot 10^{25} \text{ N}$, onde o raio **r** é igual a $12 \cdot 509,91 \text{ m}$, temos uma viscosidade para a crosta de $\eta = 9,26 \cdot 10^{29} \text{ Pa s}$. Na crosta inferior dos Andes é da ordem de $2 \cdot 10^{22} \text{ Pa s}$, para espessuras superiores a 45 - 50 km. Como estamos numa região mais fria da

litosfera, sem a presença de zonas de subducção, uma viscosidade da ordem de $10^{29} - 10^{30}$ Pa s é possível. (Husson & Sempere, 2003).

Depois de obtido o trabalho é necessário determinar a quantidade de calor Q , sendo a relação com W igual a:

$$Q = W + \Delta U \quad (13)$$

onde

ΔU é a variação de energia interna ao corpo; supomos $\Delta U = 0$ já que consideramos não existir energia cinética entre as partículas que compõem o corpo. Assim temos:

$$Q = W \quad (14)$$

sabendo que:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (15)$$

onde

m é a massa, c o calor específico, e ΔT a variação de temperatura.

A massa é calculada por:

$$m = \frac{W}{c \cdot \Delta T} \quad (16)$$

A energia suficiente para aquecer em 1 Kelvin uma massa de 1 kg de água é de $4,18 \cdot 10^3$ J, que corresponde ao seu calor específico. Portanto a massa necessária para ser aquecida em **50 K**, devido ao movimento de **1mm/ano** do complexo alcalino, é de $m \approx 1,04$ bilhões de toneladas/ano. Esse valor é muito exagerado e reflete o movimento de 1mm/ano, que também é um valor extremado.

Capítulo IX - Investigação Geofísica dos Complexos Alcalinos do Sul e Sudeste do Brasil

Se supusermos que o movimento é da ordem de 1 nano mm/ano, obteríamos uma massa de água aquecida em 50 K, da ordem de $m \approx 1,04$ toneladas/ano, que não é um valor absurdo. Assim concluímos que se o complexo alcalino de Poços de Caldas pode estar em movimento, e seu deslocamento é inferior a 1mm/ano, mas com certeza superior a 1 nano mm/ano.

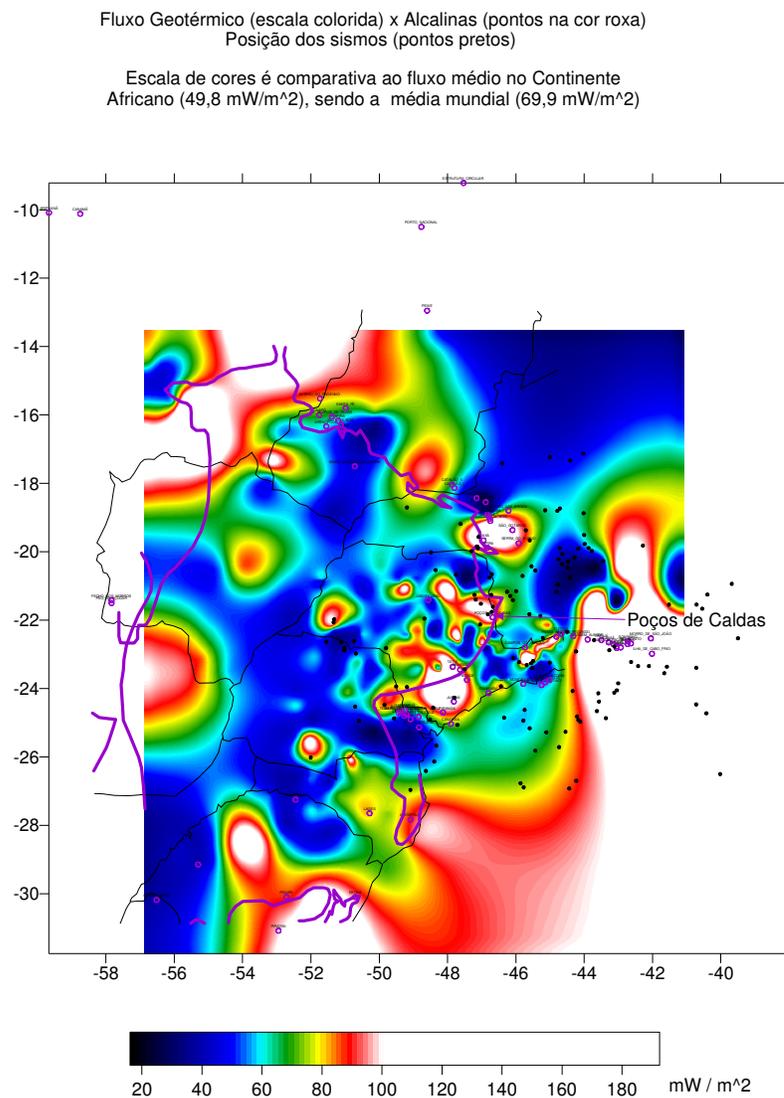


Figura 9.15. Mapa de fluxo térmico na escala colorida, comparado a posição dos complexos alcalinos, sendo representados pelos pontos roxos e a posição das ocorrências sísmicas (pontos pretos).

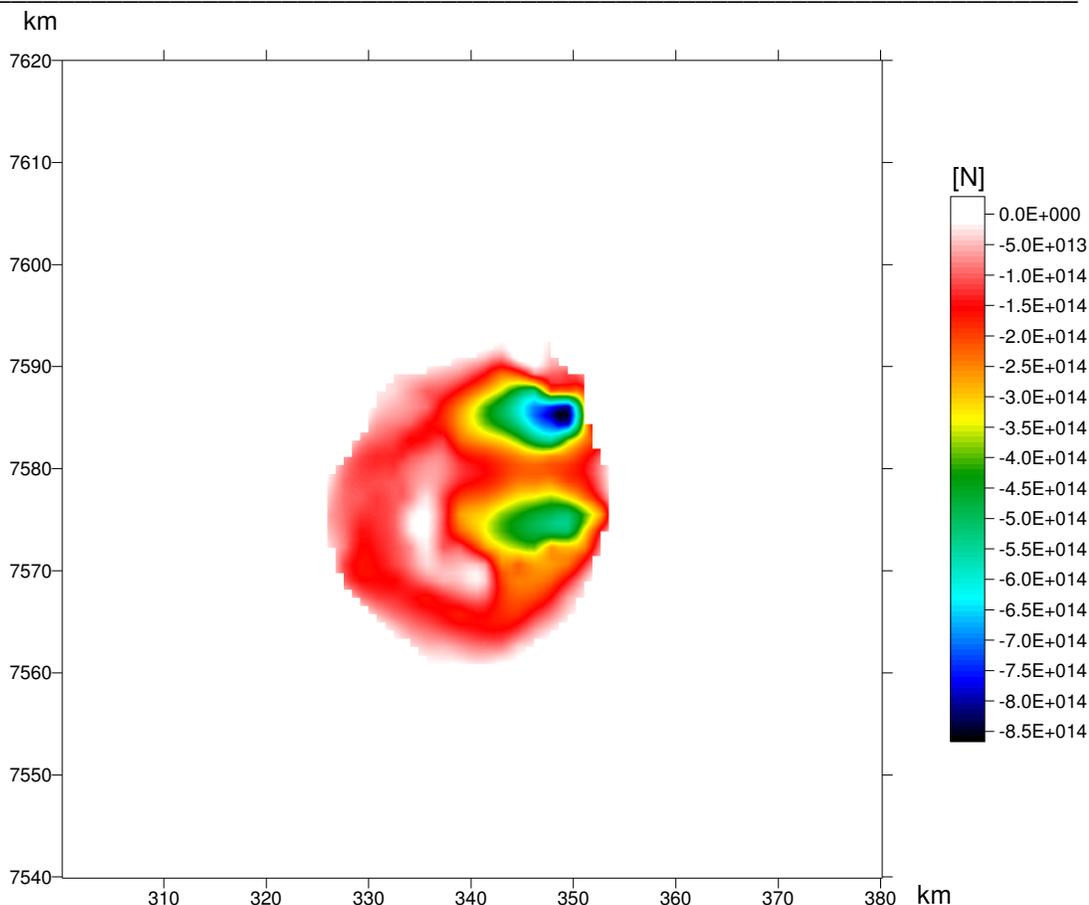


Figura 9.16. Força resultante (F_r) sobre o complexo alcalino, Peso total – Empuxo.

Um outro parâmetro que deve ser comentado é de que Poços de Caldas ainda está liberando calor devido ao seu resfriamento. Nesse caso, supondo que sua temperatura inicial era de 1200 °C e a temperatura ambiente de 25 °C, quanto tempo é necessário para que o corpo se resfrie para 50 °C? Essa questão é determinada através da lei de resfriamento de Newton:

onde

$$t = -\tau \cdot \ln \left[\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} \right] \quad (17)$$

t é o tempo, T a temperatura atual, T_0 a temperatura inicial, T_a a temperatura ambiente.

$$\tau = \frac{c_p \cdot M}{\frac{K}{L} \cdot S} \quad (18)$$

sendo c_p o calor específico a pressão constante, M a massa do corpo, K a condutividade térmica, S a área superficial e L uma constante geométrica, que no caso foi usada como sendo o diâmetro superficial (o diâmetro do corpo em superfície).

As constantes para o cálculo do resfriamento de Poços de Caldas são:

$K = 2,34 \cdot 10^3$ [W/mK], para o sienito; $c_p = 1 \cdot 10^3$ [J/kgK]; $M = 0,10216 \cdot 10^{16}$ [kg]; $L = 2 \cdot r$, para $r = 12 \cdot 509,91$ [m], o raio superficial; A área S é determinada através da área de um cone $S = \pi \cdot r \cdot [g + r]$, sendo g a geratriz e calculada através da relação: $g = \sqrt{r^2 + h^2}$, para $h = 51 \cdot 015,0$ [m] a profundidade. Portanto aplicando-se os parâmetros obtém-se:

$$\tau = \frac{c_p \cdot M}{\frac{K}{L} \cdot S} = 4,26687 \times 10^{12} \text{ que resulta em } t = -4,26687 \times 10^{12} \cdot \ln \left[\frac{50 - 25}{1200 - 25} \right],$$

$t = 1,642808 \times 10^{13}$ [s], que é da ordem de $t = 520 \cdot 930,97$ [anos].

Esse resultado indica que o complexo de Poços de Caldas já deve ter se resfriado através da condução de calor. O tempo obtido de 521 mil anos é aproximado, principalmente porque a temperatura ambiente em profundidade é superior a 25 °C, mas se fizermos um cálculo supondo a perda de apenas 1 °C, ou

seja, $T_a = 1198$ °C, a temperatura inicial $T_0 = 1200$ °C, e a temperatura final de $T = 1199$ °C, ou seja, o meio se resfria juntamente com o corpo, temos um tempo de resfriamento de $t = 93\,775,97$ ano/°C em profundidade. Assim sendo, podemos estimar o tempo necessário para o corpo se resfriar 1150 °C, como no exemplo anterior, supondo que a temperatura ambiente decresça proporcionalmente ao resfriamento do corpo na magnitude de 1 °C,

$$\left[\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} \right] = \left[\frac{1199 - 1198}{1200 - 1198} \right] = \left[\frac{1}{2} \right], \text{ sempre permanecendo a razão com a proporção}$$

$\frac{1}{2}$. Logo integrando temos, $t = 93\,775,97 \times 1150$ °C = $107\,842\,365,5$ anos, que dá aproximadamente 108 Ma para se resfriar, a um volume constante. Portando, não é possível descartar que a alcalina de Poços de Caldas ainda esteja liberando calor para o meio, através de condução térmica, já que, datações radiométricas indicam idades de 50 M anos para os tipos litológicos do complexo. Essa magnitude de resfriamento corresponde a um valor limite.

Uma das conclusões, a partir da verificação de todos os fatores, e estando em concordância com o fluxo térmico (Figura 9.15), é de que a liberação de calor em Poços de Caldas pode ser proveniente do seu movimento vertical, do seu resfriamento, do decaimento radioativo, já que o local apresenta grandes reservas uraníferas e pela existência de falhas profundas que em parte podem ser oriundas do seu movimento na crosta. Porém falta mais um fator que não foi analisado. Pode ser que o complexo esteja sendo aquecido em profundidade por alguma fonte térmica originária da base da litosfera ou astenosfera. Essa componente deve ser analisada através de dados sismológicos. Rocha (2003) realizou um

trabalho visando o imageamento das porções interiores da Terra através de tomografia sísmica. Algumas imagens tomográficas são observadas nas Figuras 9.16 e 9.17. Na Figura 9.16 é observada a imagem tomográfica para uma profundidade de 150 km, juntamente com os perfis analisados pelo autor, sendo os valores próximos à cor vermelha, interpretada como regiões que apresentam anomalia térmica. Já na Figura 9.17 é observado o perfil BB', o mesmo fora escolhido devido a sua proximidade a Poços de Caldas e por passar sobre a alcalina de Jaboticabal. Nessa figura é verificado que Poços de Caldas não está sendo aquecido por fontes mantélicas, portanto o fluxo térmico na região é proveniente dos fatores anteriormente destacados.

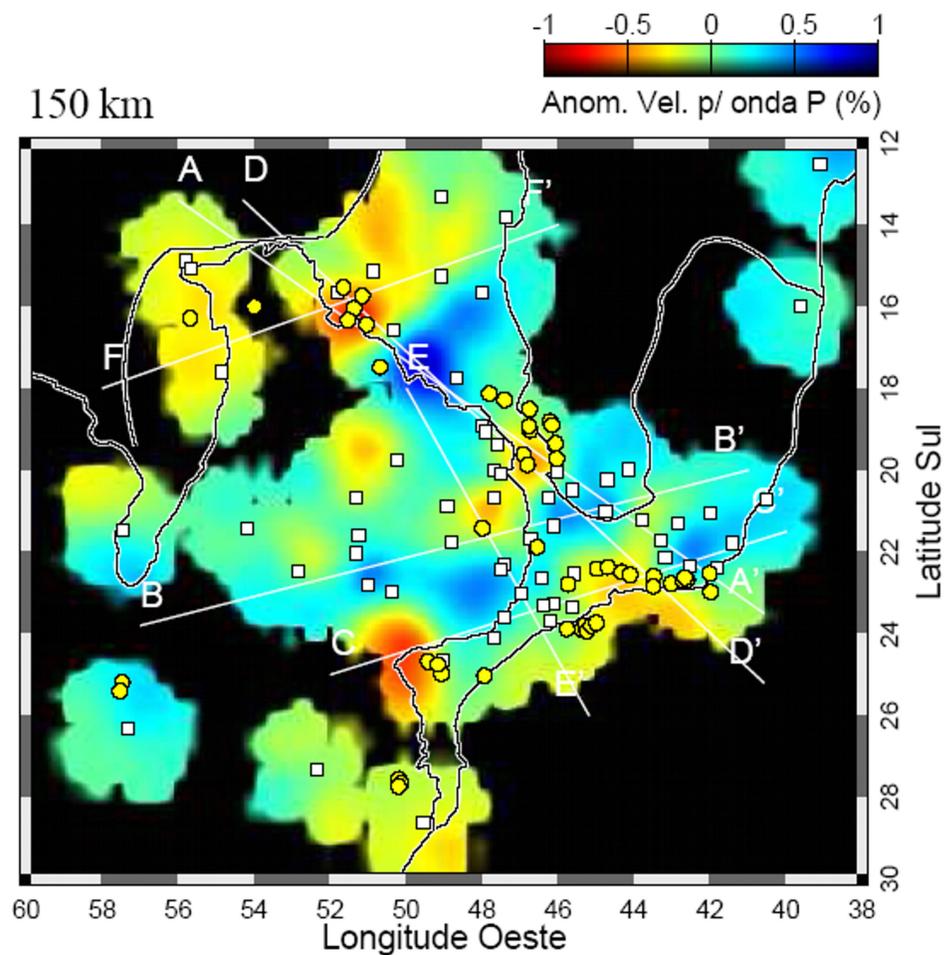
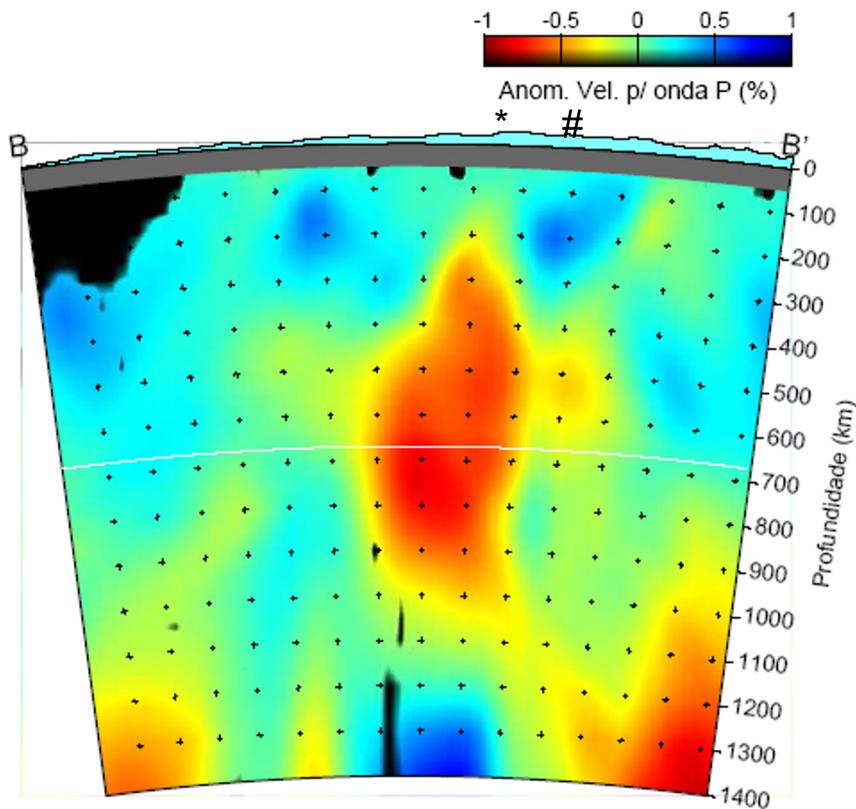


Figura 9.16. Tomografia sísmica (Rocha, 2003); circunferências na cor amarela representam as rochas alcalinas e os pontos quadrados, as estações sísmicas. As variações na velocidade das ondas sísmicas são interpretadas como sendo resultantes de anomalias térmicas.



* Alcalina de Jaboticabal
Complexo alcalino de Poços de Caldas

Figura 9.17. Perfil BB' dos dados de tomografia sísmica da FIGURA 9.16, (Rocha, 2003). Na Figura observa-se uma anomalia térmica abaixo da alcalina de Jaboticabal; o mesmo não é verificado para Poços de Caldas, que se configura na maior manifestação alcalina do Brasil. Deve ser lembrado que a profundidade na ordem de grandeza de 200 km se refere aproximadamente à base da litosfera.

9.5 Conclusão

O volume estimado através do modelo 3D de formato irregular foi de 8 200,7 km³ e massa de 1 021 600 M ton. Estimativas anteriores convergem para esse valor, mesmo modelando-se o corpo para uma densidade equivalente de 2,60 g/cm³ (densidade média do nefelina sienito). Como observado no mapa anômalo Bouguer, Poços de Caldas é um corpo homogêneo do ponto de vista gravitacional, sem a presença de anomalias na porção interna da alcalina.

Como existe um contraste de densidade, e o corpo está mergulhado na crosta, com densidade inferior, é previsível que exista um possível deslocamento vertical, no sentido contrário ao da aceleração da gravidade devido a forças hidrodinâmicas. Para a crosta pode ser obtida, através do movimento da alcalina, uma viscosidade de 10²⁹ a 10³⁰ Pa s, para um movimento de 1mm/ano. Husson, L. & Sempere T., (2003) estimaram uma viscosidade para a crosta inferior nos Andes da ordem de 10²⁰ Pa s, para espessuras crustais de 45 a 50 km.

Poços de Caldas, com 50 Ma, ainda pode estar perdendo calor através de condução térmica, sendo previsto mais 58 Ma para se resfriar completamente, a um volume constante, através apenas da condução de calor. A alcalina não está sendo suprida por calor mantélico (astenosferico) como observado pelos dados sísmicos de Rocha (2003), vide Figura 9.17.

9.6 Referência

Arzamastsev A.A., Bea F., Glaznev V.N., Arzamastseva L.V., Montero P.2001. Kola alkaline province in the Paleozoic: evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions. Russian Journal of Earth Sciences, 3: 1 - www.agu.org/wps/rjes/v03/tje01054/tje01054.htm

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. Alakaline 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.

Husson, L. & Sempere T., (2003). Thickening the Central Andes, Models and Observations. European Geophysical Society. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 5, 06851.

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.

Murthy I.V.R. & Swamy, K.V. 1995. Gravity anomalies of a vertical cylinder of polygonal cross-section and their inversion. *Computers & Geosciences* 22: 6, 625-630, 1996. Copyright 1996 Elsevier Science Ltd.

Parisi C.A. 1988. Jazidas de bauxita da região de Poços de Caldas, Minas Gerais - São Paulo. In Schobbenhaus C. & Coelho C.E.S. - coords. - Principais depósitos minerais do Brasil. (Vol III), metais básicos não-ferrosos, ouro e alumínio, DNPM / CVRD, Brasília, pg. 661-666.

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.

ROCHA, M.P., 2003. Ampliação da tomografia sísmica no manto superior no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil com ondas P. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG/USP. Dissertação de mestrado. 71 p.

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. John Wiley & Sons, 622pp.

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. 1984. A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG – SP. São Paulo, 480p. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado.

ULBRICH H.H. & ULBRICH M.N.C. 1992. O Maciço alcalino de Poços de Caldas, MG – SP: Características Petrográficas e Estruturais. Roteiro de Excursão do 37º Congresso Brasileiro de Geologia. SBG/SP. Vol. 5. São Paulo, SP, 1992.

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 Geophysicsts.