

Mapas de anomalias gravimétricas da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira – USP/SP

Gravimetric anomaly maps from Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira – USP/SP

Yára Regina Marangoni¹, Denise Silva de Moura^{1,2}, Herbert Ferreira¹

¹Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo - USP, Rua do Matão, 1.226 - CEP 05508-090, São Paulo, SP, BR (yaramaran@usp.br, herbert@iag.usp.br)

²Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, BR (denise.moura@usp.br)

Recebido em 13 de setembro de 2016; aceito em 05 de abril de 2017

Resumo

A Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, da Universidade de São Paulo (CUASO – USP/SP), é considerada um laboratório natural de pesquisas em Ciências da Terra. Ao longo de mais de duas décadas, dados gravimétricos foram obtidos como forma de treinamento de alunos e técnicos, formando um conjunto de 787 pontos distribuídos em 8 km². O mapa de anomalia ar-livre apresenta forte correlação com a topografia, enquanto o mapa de anomalia Bouguer não apresenta correlação com a topografia e a geologia. Este mapa permitiu identificar um gradiente EW centrado na área, revelando uma estrutura de subsuperfície, modelada, neste mesmo estudo, como uma falha praticamente vertical, com atitude 090/80 N e cerca de 50 m de deslocamento vertical.

Palavras-chave: Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO-USP/SP); Mapa Bouguer; Gravimetria; Bacia de São Paulo.

Abstract

The Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira at Universidade de São Paulo (CUASO – USP/SP) is considered a natural research laboratory in Geosciences. For more than two decades gravity stations were set in the area as part of the training of students and technicians. It formed a set of 787 points distributed in 8 km². The free-air anomaly map shows a strong correlation with topography, but Bouguer anomaly map does not show correlation with topography and geology. This map enhances an EW gradient through the central part of the area. This was modeled as an almost vertical fault, 090/80 N, with circa 50 m of vertical displacement.

Keywords: Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO – USP/SP); Bouguer Map; Gravimetry; São Paulo Basin.

INTRODUÇÃO

A Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, da Universidade de São Paulo (CUASO-USP/SP), é considerada um laboratório de pesquisas por alunos de graduação e pós-graduação em várias áreas. Isso se deve à facilidade de acesso para pesquisa, à diversidade de ambientes geológicos e às possibilidades de utilização da área para montagem de sítios de experimentos quase que totalmente controlados, como no caso do Sítio Controlado de Geofísica Rasa do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (SCGR/IAG), muito utilizado em pesquisas de Geofísica rasa aplicada a ambientes urbanos (Porsaniet et al., 2004, 2006, entre outros). Diversas dissertações de mestrado e teses de doutorado relacionadas a aspectos de Geologia, Geotécnica, Hidrogeologia e Geofísica também utilizaram o espaço da CUASO como objeto de estudo (Cozzolino, 1972; Iritani, 1993; Borges, 2007; entre outras).

Este trabalho teve como objetivo apresentar o resultado dos levantamentos gravimétricos na CUASO por meio do mapa de anomalia Bouguer com a modelagem direta de dois perfis gravimétricos. Interpretações iniciais dos dados gravimétricos e de algumas feições podem ser observadas em Fernandez (2011), Momo (2012) e Moura (2013).

CUASO: LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DA ÁREA

A CUASO, principal *campus* da USP na cidade de São Paulo, localiza-se em sua porção Oeste, entre as coordenadas UTM 23 S 7.392 km e 7.395 km Norte e 322 km e 326 km Leste (Iritani, 1993). Conforme informação no *site* da Prefeitura do *Campus* da Capital, a CUASO “(...) foi criada a partir de duas áreas principais: inicialmente da gleba entre a Adutora de Cotia e o Ribeirão Jaguaré (destacada da Fazenda Butantan), em 1941, e posteriormente da gleba desapropriada entre a nova e a velha Estrada de Itú, em 1944, perfazendo aproximadamente 4.700.000,00 m²; o equivalente aos 200 alqueires paulistas previstos na criação (...)” (PUSP-C, 2011).

A topografia da CUASO é bastante plana próxima ao Rio Pinheiros, com altitudes entre 718 e 725 m, que representa a planície de inundação deste rio. Ao Sul, o relevo é mais íngreme, alcançando mais de 790 m de altitude e revelando um desnível de cerca de 70 m entre a Raia Olímpica e o Instituto de Ciências Biomédicas (ICB). Um mapa planialtimétrico da CUASO pode ser observado na Figura 1. Esse mapa baseia-se nas altitudes obtidas durante a coleta de dados gravimétricos. A obtenção dessas altitudes variou ao longo dos anos de coleta de dados, e foram utilizadas informações de cartas topográficas na escala 1:1.000, uso de referências de nível (RN) distribuídas pela CUASO, levantamento barométrico e GPS diferencial.

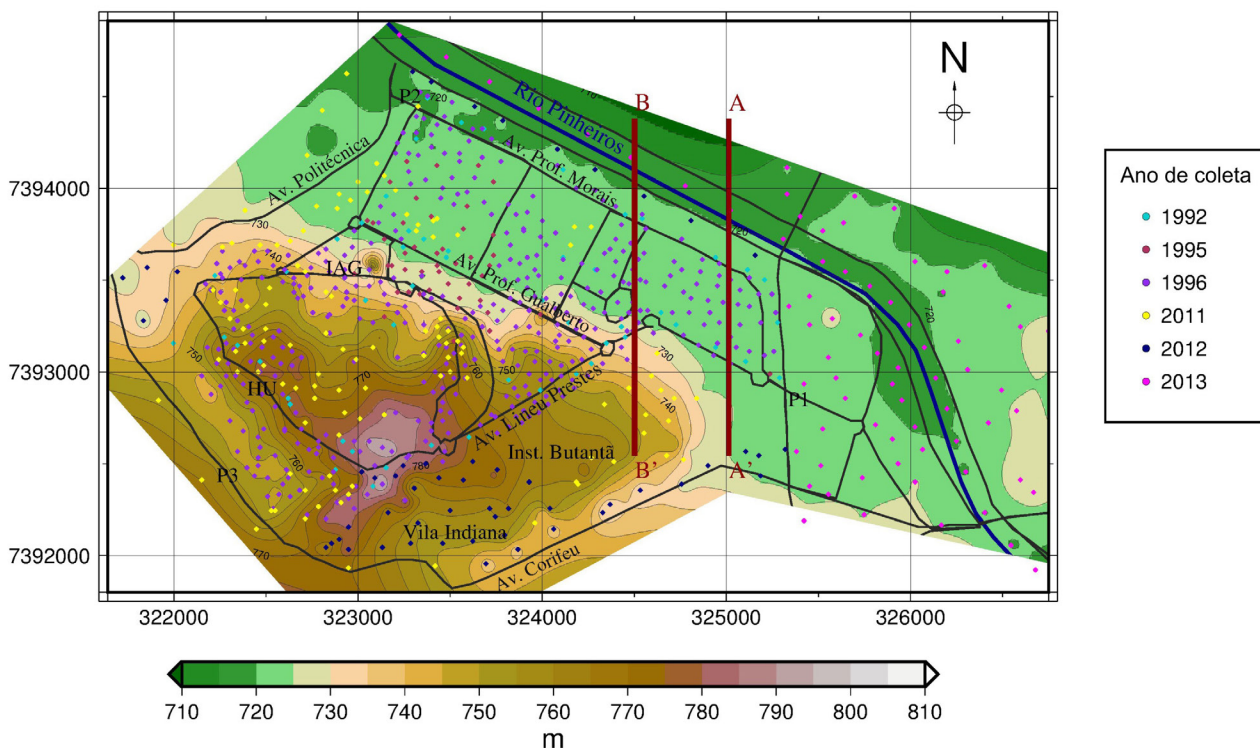


Figura 1. Mapa topográfico e distribuição das estações gravimétricas na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira por ano de aquisição. Os perfis AA' e BB', usados no modelo gravimétrico direto, estão marcados no mapa.

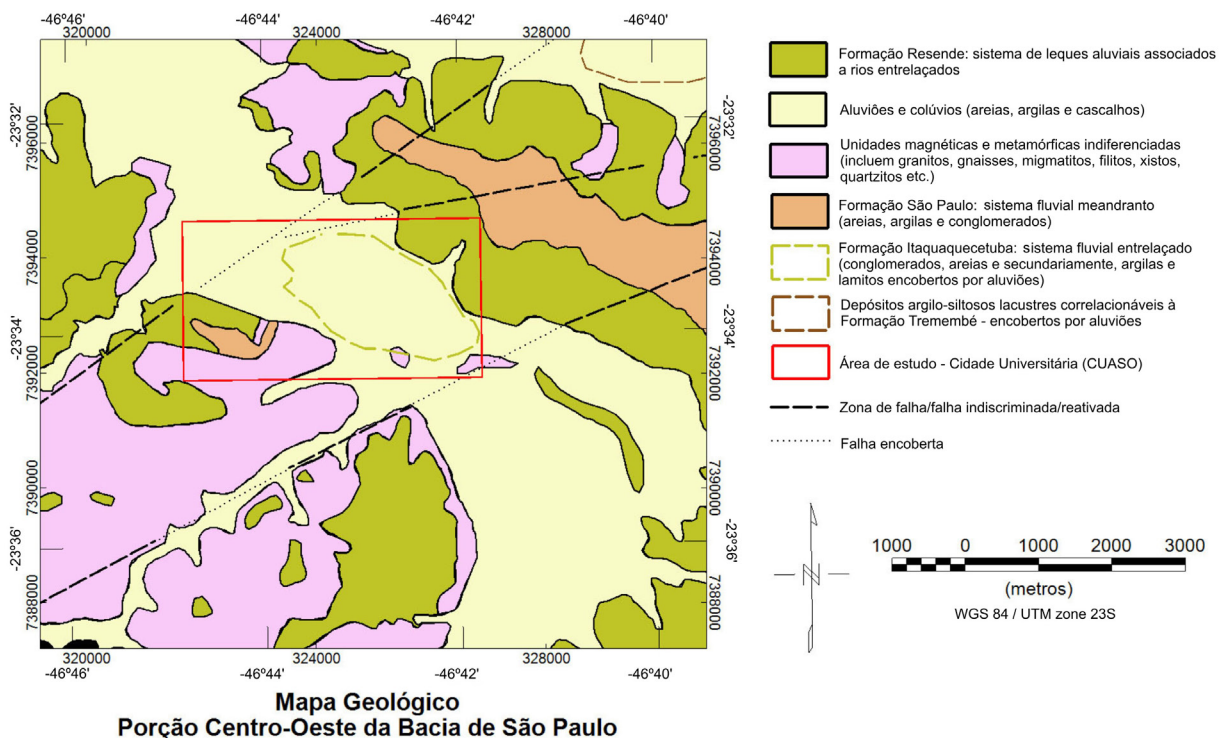
A CUASO encontra-se na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, que faz parte de um conjunto de bacias sedimentares que se desenvolveu no Cenozoico ao longo da margem Sudeste do Brasil, englobando bacias sedimentares que vão do litoral do Rio de Janeiro até o Paraná. Ela pertence à porção central do Rift Continental do Sudeste do Brasil (Riccomini et al., 2004), definido por Riccomini (1989) a partir de proposta de Almeida (1976). O rifteamento está relacionado ao evento de ruptura do Atlântico Sul, o que gera espaço de acomodação para uma série de bacias do tipo rifte. O modelo de formação dessas bacias e do soerguimento das serras do Mar e da Mantiqueira ainda não é consensual (Riccomini et al., 2004). A coluna litoestratigráfica da Bacia de São Paulo foi definida por Riccomini (1989). Esta, originalmente, era um hemigráben, controlado por falhas normais que foram reativadas ao longo das zonas de cisalhamento de Taxaquara e Jaguari, na borda Norte da bacia (Riccomini et al., 2004).

O embasamento da Bacia de São Paulo é constituído de rochas ígneas e metamórficas do Cinturão de Dobramentos Ribeira, de idade pré-cambriana. O preenchimento ocorreu do Paleógeno ao Quaternário, e corresponde a sedimentos de leques aluviais, planície aluvial e lacustre e depósitos fluviais meandantes, aluviais e coluviais (Gurgueira, 2013).

Na CUASO, segundo Takiya (1991) e Rodriguez (1998), afloram rochas do embasamento cristalino, pertencentes ao Complexo Embu e Suítes Graníticas Indiferenciadas; rochas

sedimentares representativas das formações Resende e São Paulo (Grupo Taubaté) e sedimentos quaternários. Também é possível notar a presença de uma faixa de cisalhamento muito próxima à CUASO e talvez adentrado à área de estudo. O mapa geológico da região de estudo encontra-se na Figura 2, uma adaptação do Mapa Geológico da Porção Centro-Oeste da Bacia de São Paulo, de Takiya (1991), em que foi demarcada a área da CUASO.

O Complexo Embu é a maior ocorrência do embasamento, com direção preferencial NE-SW, composto por filitos, xistos, migmatitos, gnaisses migmatizados e corpos lenticulares de quartzitos, anfibolitos e rochas calciossilicatadas (Gurgueira, 2013). A idade desse complexo varia entre 811 e 594 Ma, como determinado por vários autores (Gurgueira, 2013) e em diferentes tipos de rochas. O Complexo Embu é limitado a Norte e a Sul por dois sistemas de falhas: Taxaquara – Jaguari e Cubatão, respectivamente. No mapa geológico de Rodriguez (1998), é possível verificar que outras falhas, também de direção NE-SW, cortam o complexo. As Suítes Graníticas Indiferenciadas, mais resistente ao intemperismo, são formadas por granitos, de origem sintectônica a pós-tectônica (Rodriguez, 1998), que, como é um material mais resistente à erosão, servem de sustentação aos altos morfológicos observados na bacia (Gurgueira, 2013). Essa relação pode ser observada na porção SW da CUASO (Figura 3), onde as maiores altitudes encontram-se sobre os afloramentos do embasamento e da Formação Resende.



A investigação geológico-geotécnica, realizada nos três furos do SCGR/IAG/USP, indicou que o embasamento rochoso nessa porção é composto por migmatitos e que o topo rochoso apresenta-se muito a extremamente alterado, com uma espessura média de 4,0 m (Marrano, 2002).

A Formação Resende, basal da bacia, é representada por leques aluviais de planície fluvial. Sobre essa formação foram depositados os sedimentos lacustres da Formação Tremembé, que não afloram na CUASO. A unidade topo da bacia é a Formação São Paulo, caracterizada por sedimentos de um sistema fluvial meandrante, indicando condições climáticas mais úmidas e redução da atividade tectônica. Sobre os sedimentos terciários estão depositados os sedimentos quaternários da Formação Itaquaquecetuba. A descrição detalhada do preenchimento da bacia pode ser encontrada em Riccomini e Coimbra (1992) e Cozzolino (1972), e, especificamente da CUASO, em Iritani (1993) e Porsani et al. (2004).

Segundo o mapa geológico de Iritani (1993), a Sul da CUASO é mapeada uma zona de falha com direção NE-SW.

MATERIAIS E MÉTODOS

Aquisição dos dados gravimétricos

A coleta de dados gravimétricos da CUASO ocorreu nos anos de 1992 a 1996 e de 2011 a 2013. Inicialmente, o foco era o treinamento de alunos e técnicos com os diferentes métodos de aquisição de coordenadas e do uso do gravímetro. Apenas entre 2011 e 2013 houve uma mudança nos objetivos da coleta, deixando o caráter de treinamento para o objetivo definido de obter um mapa de anomalia Bouguer da CUASO e sua interpretação, baseada nas informações geológicas.

Os dados gravimétricos somam 787 estações distribuídas em cerca de 8 km² de área da CUASO e regiões adjacentes, espaçadas em até 1 km (Figura 1). A aquisição do posicionamento vertical e horizontal variou muito ao longo das coletas. Nos levantamentos anteriores a 2000, foram utilizados mapas topográficos na escala de 1:1.000 para posicionamento horizontal e a rede de RN combinada com os mapas topográficos e altimetria por barometria para o posicionamento vertical. O erro do posicionamento horizontal nesses casos é menor que 20 m, e o erro de posicionamento vertical, menor que 1 m para os mapas topográficos e menor que 2 m para a aquisição com barometria (Sá, 2004b).

A aquisição dos dados de posicionamento geográfico e vertical nos levantamentos a partir de 2000 foi realizada por meio do posicionamento relativo pós-processado por GPS. Nesse caso, é instalado no local da coleta um tripé com uma antena receptora ligada por cabo ao receptor. A coleta se estende por cerca de 20 minutos, com intervalo de gravação de 15 segundos. Para o processamento e ajustamento das observações, é necessário o uso de dados de GPS de estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (RBMC-IBGE), especificamente das que ficam dentro de um raio máximo de 150 km da região de estudo (no mínimo três estações). Com base na solução de dupla diferença de fase com eliminação do efeito da ionosfera, o erro máximo na determinação das coordenadas é de 0,01 m (Sá, 2004a). Com as coordenadas finais, realiza-se o cálculo da ondulação do geóide para a conversão da altitude geométrica em altitude ortométrica, utilizada na redução dos dados gravimétricos. Para essa conversão utilizou-se o *software* MAPGEO (IBGE).

Dada a diferença de métodos de aquisição de dados de posição das estações, realizou-se um trabalho cuidadoso de

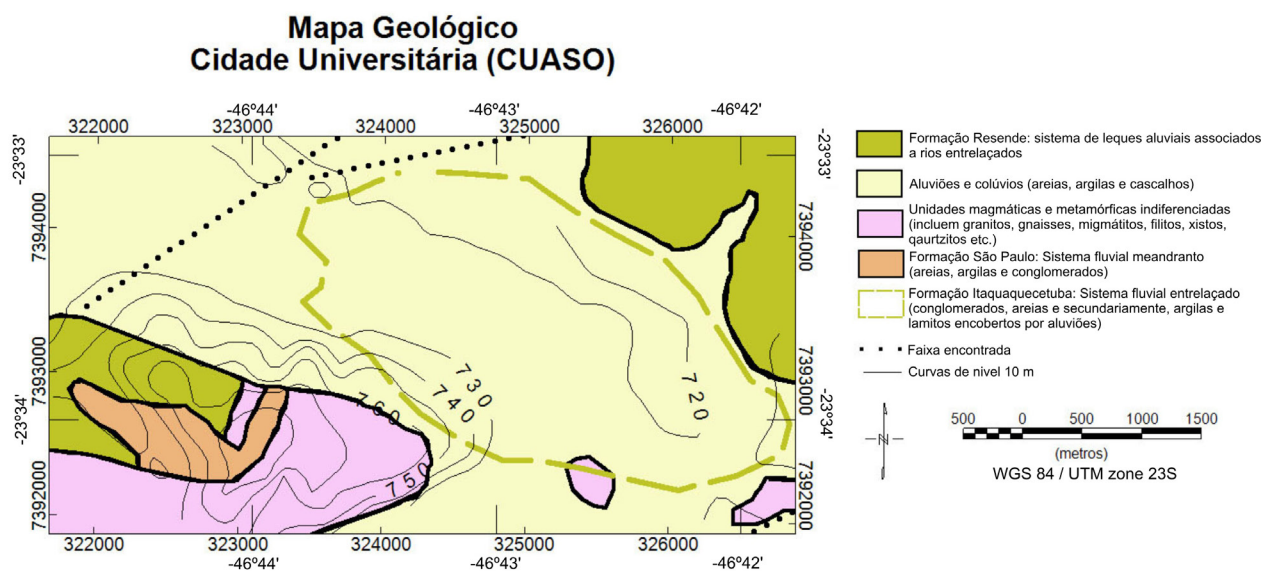


Figura 3. Mapa geológico da área de estudo (vide Figura 2) indicando as curvas de nível derivadas do levantamento gravimétrico. Curvas de contorno a cada 10 m.

repetição de amostragem em qualquer estação que apresentasse discrepância dentro do conjunto de dados, a fim de comprová-las ou corrigi-las. Foram consideradas discrepâncias os pontos com valores de anomalia que divergiam de ± 2 mGal com respeito aos pontos vizinhos. Foram refeitas cerca de 15% das estações coletadas antes de 2000 e removidos 11 pontos cujos valores mostraram-se muito discrepantes e não puderam ser reamostrados.

A aquisição dos dados gravimétricos foi realizada com base na linha gravimétrica fechada ou de base simples, que consiste em realizar a abertura e o fechamento do levantamento em uma mesma estação de referência. Utilizou-se como referência a estação gravimétrica do Laboratório de Geodésia e Gravimetria (LGG-IAG-USP) ($g = 978641,887$ mGal, latitude = $23,559050^\circ$ S, longitude = $46,734050^\circ$ W e altitude = $729,321$ m). O levantamento foi feito sempre com o gravímetro relativo LaCoste & Romberg, modelo G, com acurácia de $0,01$ mGal. Em cada estação, o procedimento padrão de observação consiste em instalar o gravímetro e nivelá-lo, posicionar o fiel na linha de referência de leitura por meio do ajuste do parafuso micrométrico, anotar a leitura e repetir a medida mais duas vezes. O levantamento é sempre

acompanhado das medidas de altitude e coordenadas horizontais, da data e da hora. Após o levantamento, os dados são reduzidos conforme os procedimentos descritos em Sá (2004b). Ao final do levantamento, considera-se que o erro da medida gravimétrica é de $0,1$ mGal.

Considerando os cuidados tomados durante o levantamento gravimétrico, a repetição das estações quando os valores divergiam de ± 2 mGal com respeito aos pontos vizinhos e a remoção daqueles que não puderam ser reamostrados, pode-se afirmar que o erro geral do levantamento gravimétrico é de, no máximo, 1 mGal.

Cálculo de anomalias gravimétricas

Um dos resultados do tratamento de dados gravimétricos terrestre é a produção de mapas de anomalia ar-livre (Figura 4) e de anomalia Bouguer (Figura 5). Anomalias ar-livre são obtidas após a correção homônima, que considera que a medida gravimétrica é feita a uma altura ortométrica h diferente daquela do nível do mar. Essa correção não considera a variação de massa entre a estação e o geoide. A anomalia de ar-livre é dada por:

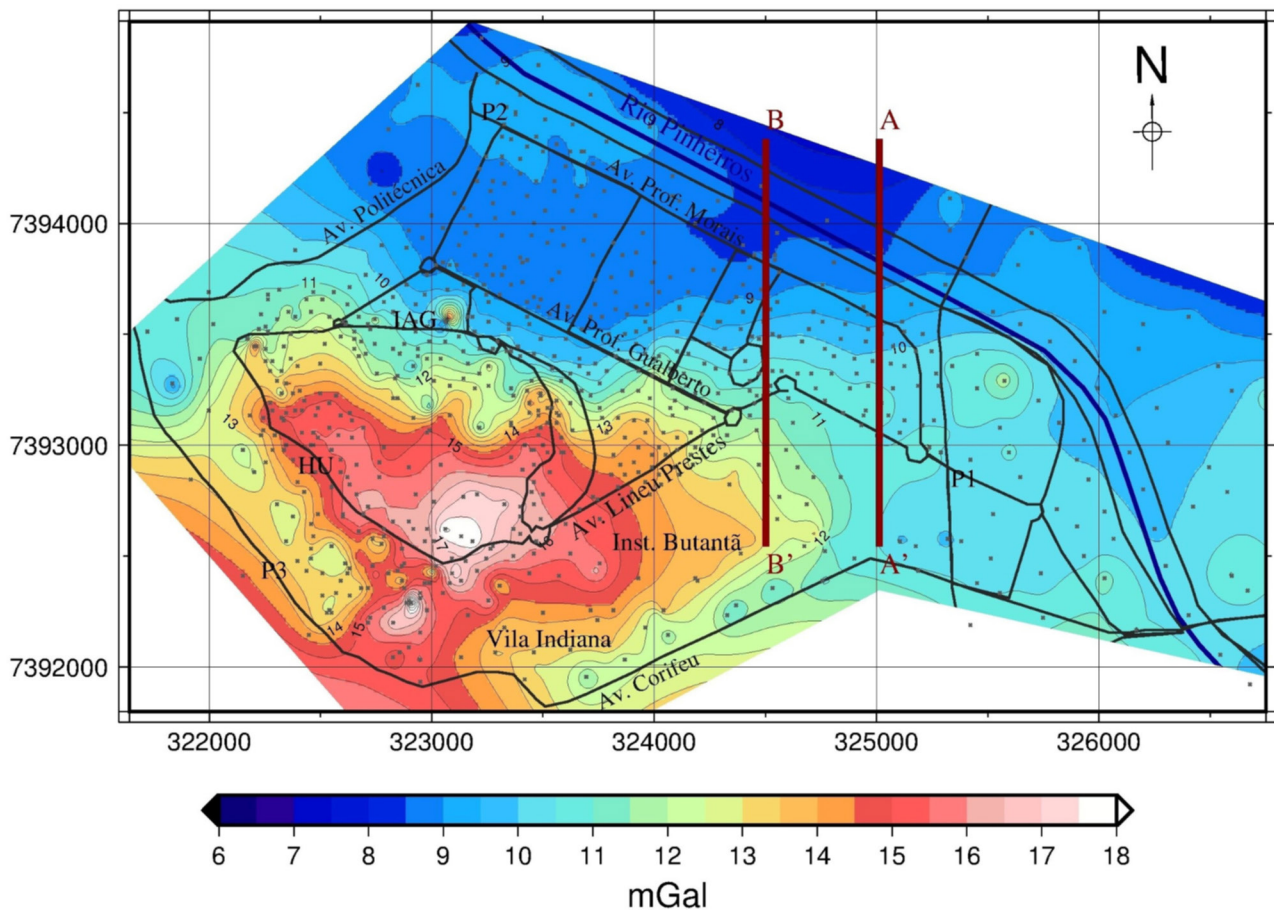


Figura 4. Mapa de anomalia ar-livre e estações gravimétricas (pontos).

$$\Delta g = g_{med} + 0,3086h - g_{teor} \quad (1)$$

onde

h é a altitude ortométrica do ponto de medida, em metros;
 g_{teor} , o valor da gravidade teórica; e
 g_{med} , o valor da aceleração da gravidade medida.

A anomalia é dada em mGal. A gravidade teórica, em mGal, utilizada foi:

$$g_{1980} = 978032,7(1 + 0,0053024 \sin^2 \phi - 0,0000058 \sin^2 2\phi) \quad (2)$$

onde

ϕ é a latitude da estação.

A correção da massa entre a posição da estação e o geóide é feita pelo platô de Bouguer, que considera a atração gravitacional de um platô com altura h centrado na estação gravimétrica. Assim, a correção Bouguer e, conseqüentemente, a anomalia Bouguer consideram o efeito

apenas da massa da topografia observada. A anomalia de Bouguer é dada por:

$$\Delta g = g_{med} + 0,3086h - 0,0419\rho h - g_{teor} \quad (3)$$

onde

$\rho = 2.670 \text{ kg/m}^3$ é a densidade usada para o material do platô de Bouguer.

A anomalia ar-livre ajuda a entender o grau de compensação isostática das massas topográficas e inferir como a massa distribui-se dentro da litosfera, enquanto a anomalia Bouguer reflete as variações de massa não relacionadas à topografia, de interesse em exploração mineral e mapeamento geológico (Lowrie, 2009; Fowler, 2005). Pequenas mudanças no valor da aceleração da gravidade refletem as variações laterais de densidade, diretamente relacionadas à litologia e às estruturas na região de estudo. Mais informações sobre o método gravimétrico podem ser obtidas em Lowrie (2009), Telford et al. (1990), entre outros; para

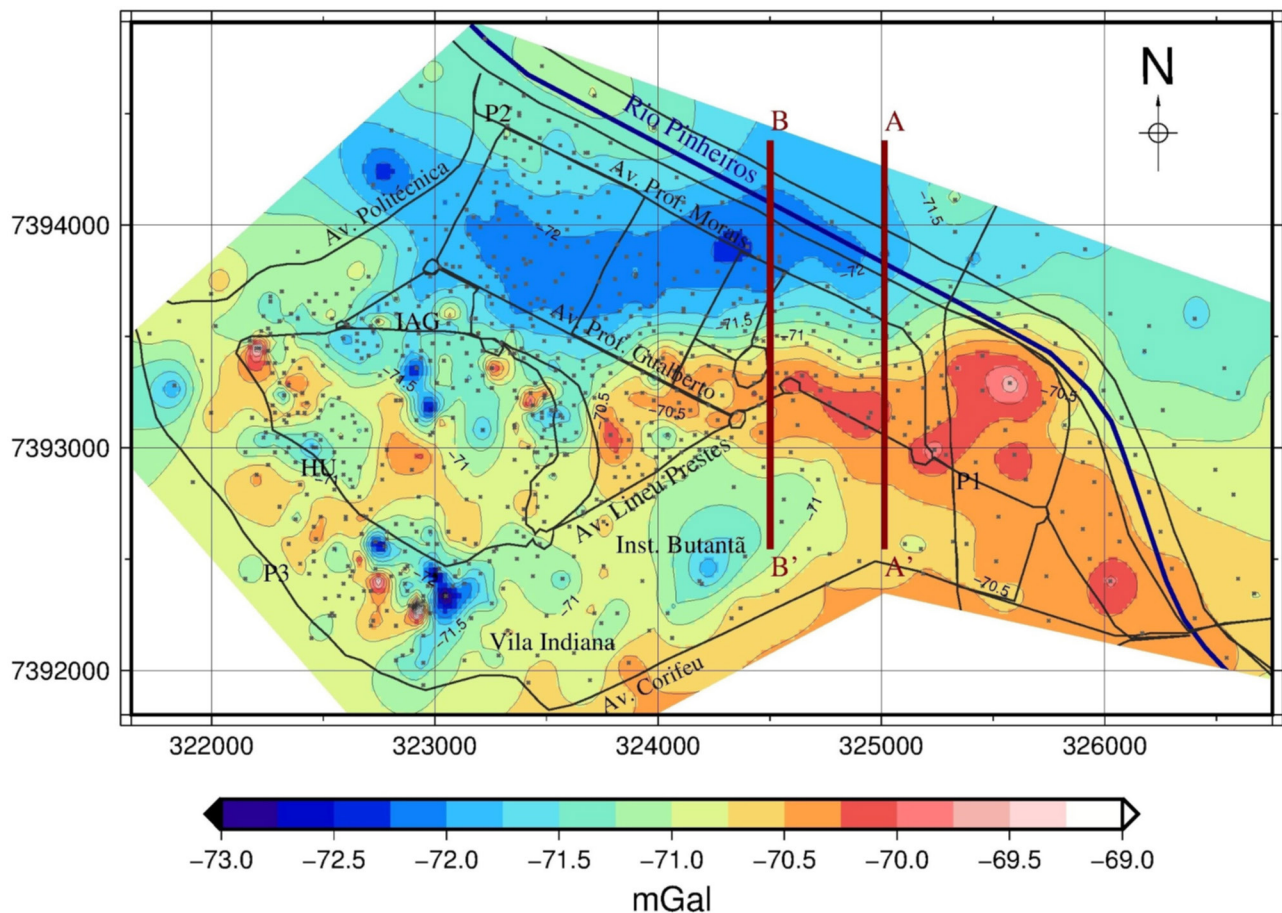


Figura 5. Mapa de anomalia Bouguer e estações gravimétricas (pontos). Curvas a cada 0,25 mGal. Neste mapa estão indicados os perfis AA' e BB', que foram modelados pelo método direto.

detalhes sobre o programa utilizado para a redução dos dados gravimétricos, ver Sá (2004b).

Mapas de anomalias gravimétricas

Os mapas de anomalias gravimétricas (Figuras 4 e 5) foram feitos usando o método de interpolação por curvatura contínua com tensão (*continuous curvature splines in tension*) (Smith e Wessel, 1990), com espaçamento de 100 m para os nós da malha regularizada, dentro do pacote GMT – *The Generic Mapping Tools* (v. 5.2.1) (Wessel et al., 2013). O método de curvatura contínua com tensão é um avanço da interpolação por mínima curvatura (Briggs, 1974), que, para regularização dos dados, utiliza uma equação diferencial em duas variáveis, com derivadas segundas contínuas, construída de tal forma que a curvatura integrada sobre toda a superfície é minimizada (Smith e Wessel, 1990; Mickus et al., 1991). Vários tipos de algoritmos foram desenvolvidos com base nas proposições de Briggs (1974) e Smith e Wessel (1990). Um deles é o módulo *surface*, parte do pacote GMT, que utiliza uma tensão para a equação de interpolação. Esse valor de tensão varia de 0 a 1, sendo 0 a solução da mínima curvatura, e 1 a harmônica, ou seja, quanto menor o valor, mais rígida se torna a superfície. Utilizamos 0,25 para os dados gravimétricos mais suaves, e 0,35 para a topografia, normalmente com variações mais bruscas de amplitude e comprimento de onda, como sugerido por Wessel e Smith (2005).

Separação regional-residual

Um dos usos do mapa de anomalia Bouguer é auxiliar na compreensão de como os diferentes tipos de litologias se distribuem em subsuperfície. A maneira usual de fazer isso é por meio do realce e da individualização das anomalias de interesse e posterior definição de um modelo geométrico com propriedades (massa e geometria) que produzam uma anomalia compatível com as observações. Um dos interesses deste trabalho é modelar as principais feições observadas no mapa de anomalia Bouguer (Figura 5). Para isso, decidiu-se realçar as anomalias por meio da separação regional-residual. Esse procedimento é um dos mais discutidos em gravimetria, por ser parcialmente subjetivo na escolha do método e do quanto é considerado regional.

Neste trabalho, optamos por seguir uma técnica similar à proposta por Mickus et al. (1991). Esta técnica baseia-se no cálculo do efeito gravimétrico de um corpo aflorante e da estimativa do alcance desse efeito. Dessa maneira, os dados que podem conter influência do corpo são removidos, e considera-se que os dados restantes representam o comportamento regional. Para que esse tenha representação, é necessário que haja uma boa distribuição de estações gravimétricas longe da área de interesse, e que esta seja pequena comparada à área considerada no regional.

Modelo gravimétrico direto 2D

Depois da separação regional-residual, as anomalias realçadas podem ser modeladas direta ou indiretamente por meio da inversão. No processo direto, o intérprete ajusta um modelo de corpo e o contraste de densidade até encontrar uma resposta teórica compatível com as observações. Os modelos diretos podem ser em 2D ou 3D, dependendo das características geológicas da área e da anomalia. No caso da CUASO, optou-se por um modelo 2D, já que as anomalias apresentam uma tendência linear de direção EW. O modelo direto 2D a partir de seções poligonais foi proposto por Talwani et al. (1959), e rapidamente transformado em diferentes algoritmos. Neste trabalho, optou-se pelo programa GravMag (proposto por Pedley et al., 1997, e disponibilizado e atualizado por Jones, 2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mapas de anomalias gravimétricas

As Figuras 4 e 5 apresentam os mapas de anomalia ar-livre e Bouguer, respectivamente. Nota-se que o intervalo de variação das anomalias é pequeno, da ordem de 10 mGal para a anomalia ar-livre e de 4 mGal para a anomalia Bouguer, refletindo as pequenas variações de altitude e de massa. Porém, a distribuição dos valores não é aleatória e parece seguir um padrão relacionado com a altitude.

A anomalia ar-livre (Figura 4) tem os menores valores, entre 8,2 e 8,5 mGal, na região da raia da CUASO, paralela ao Rio Pinheiros, cortando a cota de 720 m. Os maiores valores, entre 17,0 e 18,1 mGal, encontram-se na região de topografia mais elevada, concentrando-se na cota de 785 m. A anomalia ar-livre é bastante suave a Nordeste da Avenida Prof. Luciano Gualberto, até a região Sudeste do mapa. Os maiores valores concentram-se na porção Sudoeste da CUASO.

A anomalia Bouguer varia entre $-69,9$ e $-73,3$ mGal (Figura 5), e apresenta três conjuntos distintos. Os valores mais baixos concentram-se na porção Norte do mapa e parecem indicar uma continuação para Leste, embora não haja dados suficientes. Os valores mais altos encontram-se na região de topografia baixa, e seguem a Avenida Lineu Prestes dentro da CUASO, indo do portão P1 até o limite SE do mapa. A parte Sudoeste da CUASO é marcada por topografia mais irregular e com anomalias Bouguer de amplitudes variadas, sem apresentar correlação significativa com a topografia.

A comparação entre o mapa Bouguer (Figura 5) e o mapa geológico da CUASO (Figura 3) indica a pouca correlação entre variação lateral de densidade, representada pela anomalia Bouguer, e a geologia de superfície. Toda a parte central do mapa, representada pelos aluviões e colúvios, apresenta altos e baixos gravimétricos separados por um forte gradiente de

3,17 mGal/km na direção EW. Uma possibilidade, que será explorada neste trabalho, é que esse gradiente faça parte do sistema de falha NE-SW mapeado a Sul e a Norte da CUASO (Figura 2), talvez como um ramo com tendência EW. O embasamento exposto e as formações Resende e São Paulo, no sul da CUASO, apresentam altos e baixos gravimétricos sem muita distinção, com uma ligeira tendência do embasamento de rochas granitoides apresentar valores ligeiramente menores de anomalia. Na porção norte o padrão é mais homogêneo, predominando baixos valores da anomalia Bouguer.

Separação regional-residual

Como as anomalias Bouguer apresentam tendência linear, a melhor indicação de feição de massa seriam estruturas lineares como falhas, lineamentos e contatos. Exceto na porção SW da Figura 5, as anomalias são de longo comprimento de onda, refletindo feições profundas e regionais. A partir dessas considerações, optamos por traçar os dois perfis gravimétricos AA' e BB', marcados na Figura 5, e utilizar o programa GravMag (Jones, 2012) para realizar o modelo direto.

Para traçar os perfis decidiu-se antes pela separação regional-residual com a finalidade de ressaltar o gradiente

gravimétrico. Neste trabalho, o comportamento regional foi determinado pelo conjunto de dados gravimétricos da cidade de São Paulo e de parte da região metropolitana (Figura 6) (Guimarães et al., 2013), cerca de 100 km ao redor da CUASO. Na área da CUASO, o regional pode ser definido como uma superfície suave e contínua, com tendência NS, variando entre $-68,5$ e $-69,5$ mGal. Essa tendência foi removida dos valores observados na CUASO, seguindo a proposta de Mickus et al. (1991). A anomalia residual resultante (Figura 7) varia entre -4 mGal e $+1$ mGal.

O mapa residual (Figura 7) destacou a tendência EW, objeto de modelamento 2D, e um baixo na região SW, sendo este estudado por Fernandez (2011) e Momo (2012), que o caracterizaram como resultado de uma região muito escavada e intemperizada.

Modelos interpretativos 2D

Os perfis A e B foram modelados pelo programa GravMag (Jones, 2012). Os valores iniciais de densidade das rochas e dos sedimentos utilizados foram compilados por Fernandez (2011) a partir de outros trabalhos feitos na região da Bacia de São Paulo. Os resultados obtidos da distribuição de massa no subsolo são

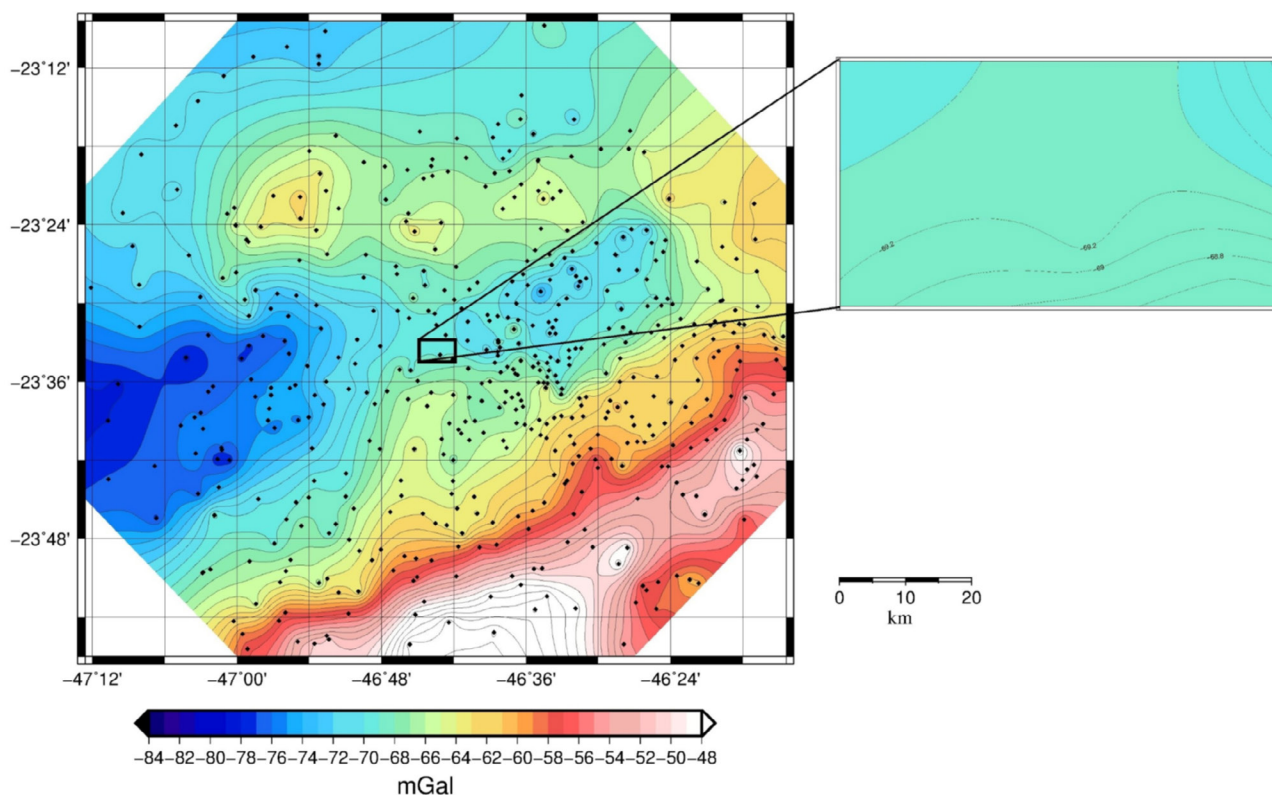


Figura 6. Mapa de anomalia Bouguer da cidade de São Paulo demarcando a região da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (zoom), considerando apenas os pontos do mapa regional.

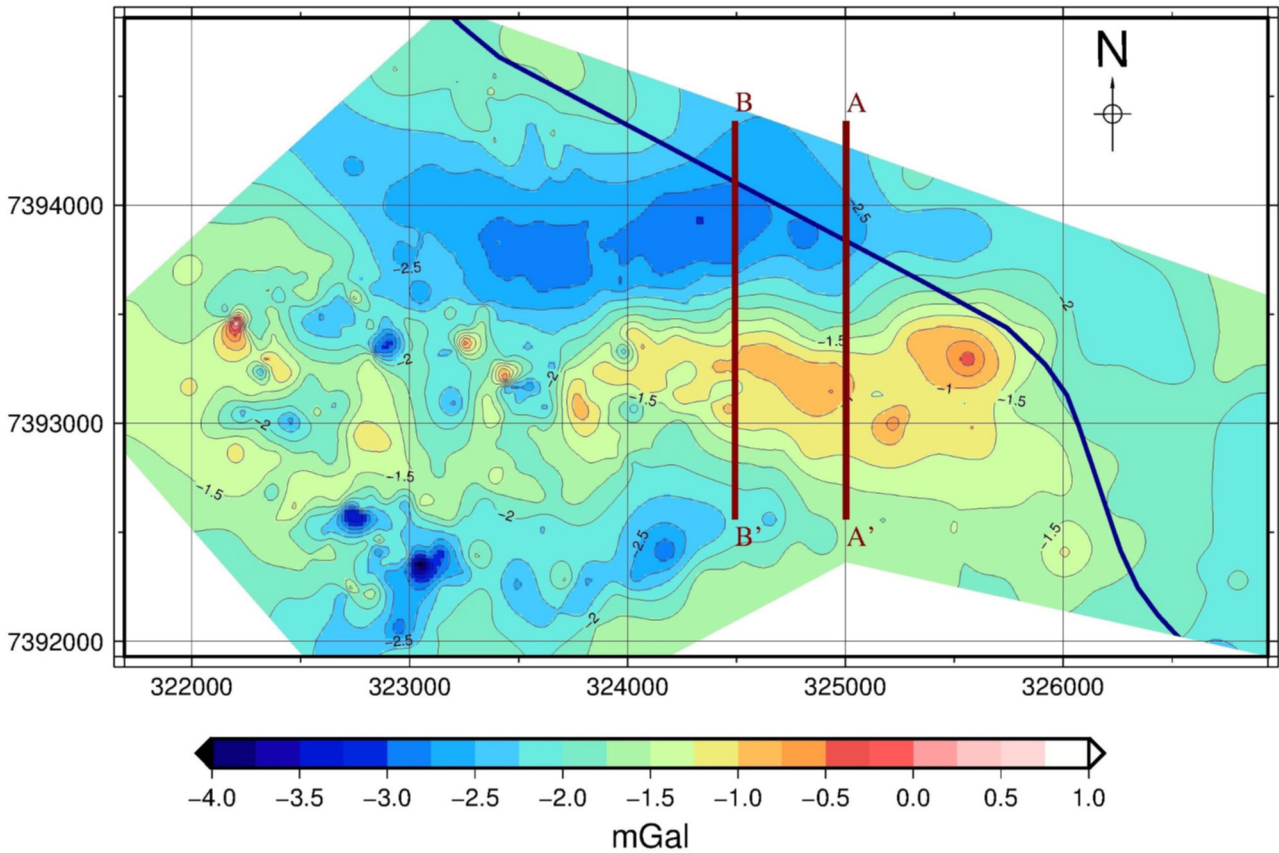


Figura 7. Mapa residual de anomalia Bouguer.

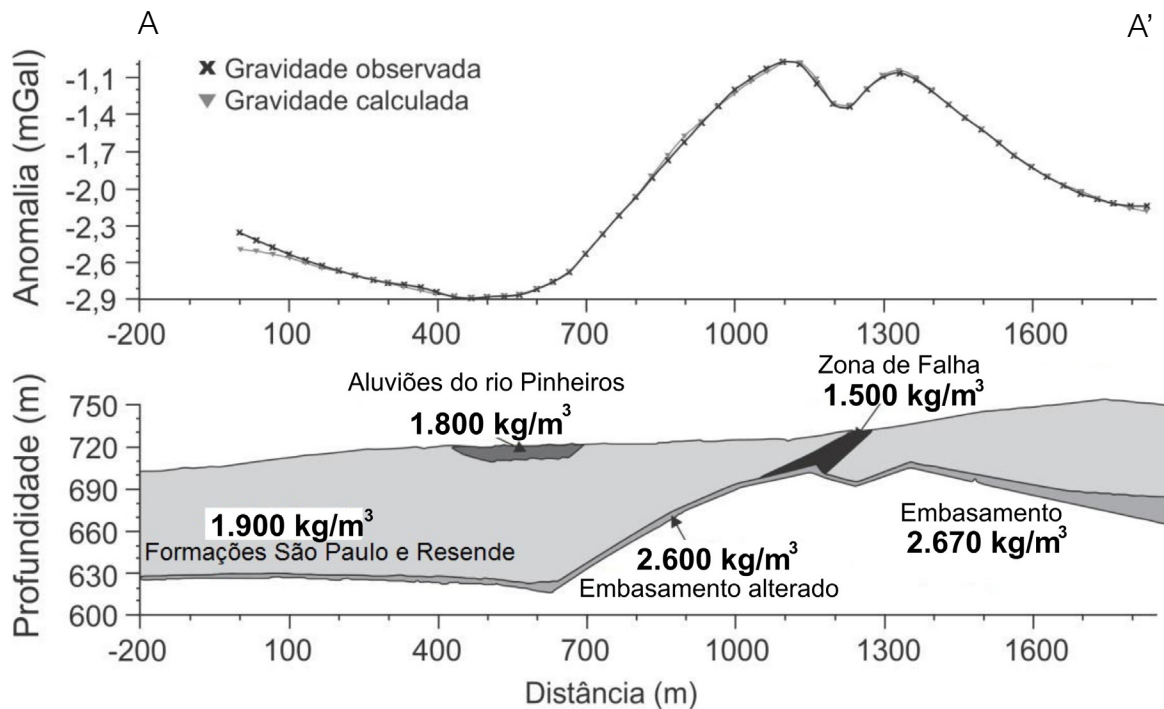


Figura 8. Modelo gravimétrico 2D para o perfil AA', assinalado na Figura 5.

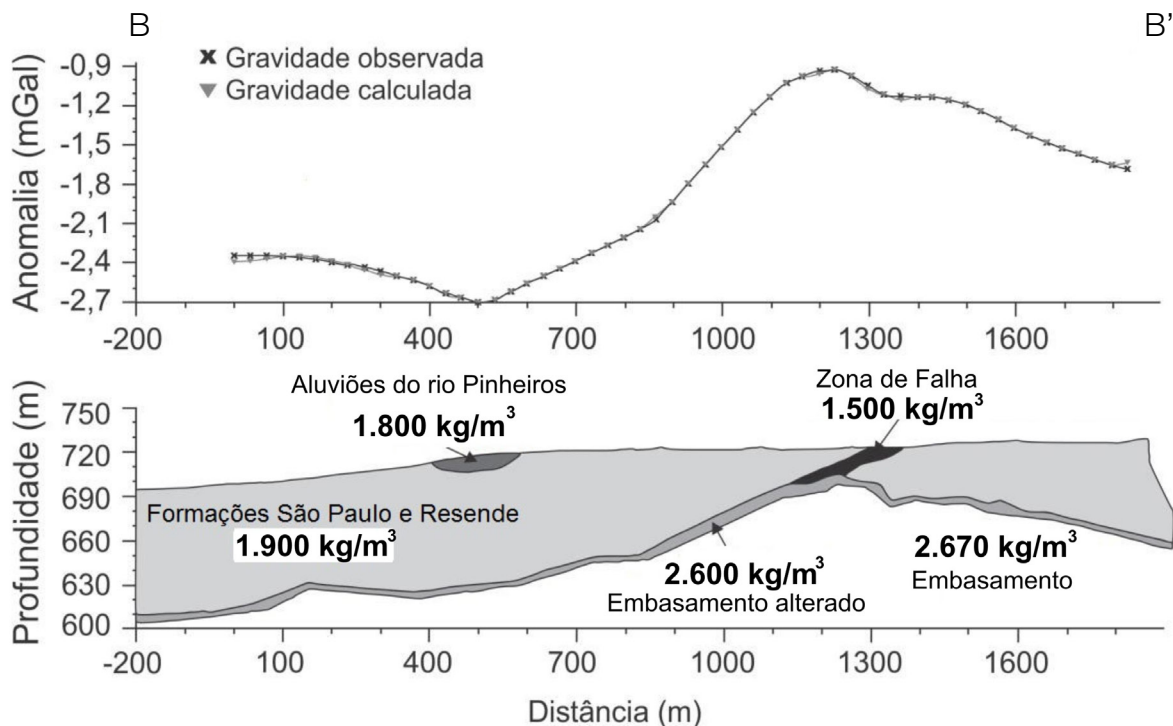


Figura 9. Modelo gravimétrico 2D para o perfil BB', assinalado na Figura 5.

mostrados nas Figuras 8 e 9 (Moura e Marangoni, 2013) para os perfis A e B, respectivamente. Foram considerados cinco conjuntos de rochas e sedimentos, o embasamento com 2.670 kg/m^3 e o topo do embasamento alterado com espessura de 4 a 5 m, como observado por Marrano (2002) e Porsani et al. (2006), com 2.600 kg/m^3 . O valor de 2.670 kg/m^3 para a densidade do embasamento competente baseou-se em duas premissas: foi o valor utilizado na correção de Bouguer e devido aos valores obtidos em quatro corpos de prova de gnaisses dos testemunhos dos furos do SCGR/IAG/USP, (2.657 ± 141) kg/m^3 (Marrano, 2002). Às rochas sedimentares das formações São Paulo e Resende, foi atribuída uma densidade de 1.900 kg/m^3 . Às rochas sedimentares próximas do Rio Pinheiros, foi atribuída a densidade de 1.800 kg/m^3 , considerando que, originalmente, o rio tinha um traçado meandrante com planícies de alagamento, que poderiam adentrar onde hoje se encontra a CUASO. Às rochas na região modelada como estrutura de falha, optou-se pelo menor valor de densidade: 1.500 kg/m^3 .

Nota-se uma excelente concordância entre as observações e a resposta teórica do modelo, com embasamento mais raso na porção Sul dos perfis. A hipótese de uma zona de falha com mergulho forte foi modelada de forma satisfatória.

CONCLUSÕES

Os mapas topográficos (Figura 3) e de anomalia ar-livre (Figura 4) indicam forte correlação entre os altos topográficos

e as respectivas anomalias, além do embasamento e das rochas das formações Resende e São Paulo, na porção SW. Pelo contrário, no mapa de anomalia Bouguer (Figura 5), observou-se baixa correlação entre as anomalias e a geologia de superfície, destacando-se o gradiente na direção EW e algumas anomalias pontuais na porção Sul.

Para entender melhor as feições observadas no mapa de anomalia Bouguer, foram modelados dois perfis de direção NS, cortando o gradiente gravimétrico alinhado na direção EW. A principal hipótese nesse modelo foi que o gradiente seria a resposta de uma região de falha (C. Riccomini, comunicação pessoal). Os resultados obtidos (Figuras 8 e 9) indicam uma falha normal modelada com atitude 090/80 N e cerca de 50 m de deslocamento vertical, aproximadamente entre 20 e 70 m de profundidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos, alunos e docentes que passaram pelo Laboratório de Geodésia e Gravimetria e coletaram esses dados durante treinamento. D. S. Moura agradece à Universidade de São Paulo (USP) pelas bolsas de Ensino à Pesquisa e de Iniciação Científica. Aos colegas D. Blitzkow e A.C. de Matos pelos dados da Grande São Paulo, e à C. Riccomini pelas discussões sobre a geologia da Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO) da USP. Os autores também são gratos pelas sugestões dos dois revisores.

REFERÊNCIAS

- Almeida, F.F.M. (1976). The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 48 (suplemento), 15-26.
- Borges, W.R. (2007). *Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- Briggs, I.C. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39, 39-48.
- Cozzolino, V.M.N. (1972). *Tipos de sedimentos que constituem a Bacia de São Paulo*. Tese (Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- Fernandez, D.A. (2011). *Campo de gravidade da região da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira em São Paulo. Coleta, processamento e modelagem de dados gravimétricos*. Monografia (Bacharelado em Geofísica). São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- Fowler, C.M.R. (2005). *The solid Earth: An introduction to global geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Guimarães, G.N., Matos, A.C.O.C., Blitzkow, D. (2013). Gravimetric densification in the State of São Paulo aiming a geoid model. *Revista Brasileira de Geofísica*, 31, 631-642.
- Gurgueira, M.D. (2013). *Correlação de dados geológicos e geotécnicos na Bacia de São Paulo*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2010). *Modelo de Ondulação Geoidal*: MAPGEO. Acesso em novembro de 2015. <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/formas_de_acesso.shtml>.
- Iritani, M.A. (1993). *Potencial hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Jones, C.H. (2012). *Updaters for GravMag*. Acesso em 01 de junho de 2016, <<http://cires.colorado.edu/people/jones.craig/GSSH/updaters/GravMag.html>>.
- Lowrie, W. (2009). *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Marrano, A. (2002). *Investigação geológico-geotécnica na área do campo de provas do IAG-USP*. Relatório técnico. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- Mickus, K.L., Aiken, C.V.L., Kennedy, W.D. (1991). Regional-residual gravity anomaly separation using the minimum curvature technique. *Geophysics*, 56, 279-283.
- Momo, R.R.B. (2012). *Investigação geofísica no campus da USP/São Paulo integrando dados sísmicos e gravimétricos*. Monografia (Bacharelado em Geofísica). São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- Moura, D.S. (2013). Mapa Gravimétrico da Cidade Universitária CUASO. *XVIII Simpósio de Iniciação Científica do IAG-USP*. São Paulo: Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- Moura, D.S., Marangoni, Y.R. (2013). Mapa Gravimétrico da Cidade Universitária CUASO. *21.º SIICUSP*. Acesso em 09 de junho de 2016, <<https://uspdigital.usp.br/siicusp/cdOnlineTrabalhoVisualizarResumo?numeroInscricaoTrabalho=4274&numeroEdicao=21>>.
- Pedley, R.C., Busby, J.P., Dabek, Z.K. (1997). *GravMag user manual: interactive 2.5 D gravity and magnetic modeling*. London: British Geological Survey, Technical Report WK/93/26/R.
- Porsani, J.L., Borges, W.R., Rodrigues, S.I., Hiodo, F.Y. (2006). O sítio controlado de geofísica rasa do IAG/USP: instalação e resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(1), 49-61.
- Porsani, J.L., Borges, W.R., Elis, V.R., Diogo, L.A., Hiodo, F.Y., Marrano, A., Birelli, C.A. (2004). Investigações geofísicas de superfície e de poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(3), 245-258.
- Prefeitura do Campus USP da Capital – PUSP-C. (2011). *Campus da capital*. Acessado em 20 de outubro de 2015, <http://www.puspc.usp.br/?page_id=31>.
- Riccomini, C. (1989). *O rift continental do Sudeste do Brasil*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Riccomini, C., Coimbra, A.M. (1992). Geologia da Bacia Sedimentar. In: A.A. Ferreira, U.R. Alonso, P.L. Luz (Eds.), *Solos da cidade de São Paulo (37-94)*. São Paulo: ABMS/ABEF.

- Ricomini, C., Sant'Anna, L.G., Ferrari, A.L. (2004). Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B. B. Brito-Neves (Eds.), *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (383-405). São Paulo: Beca.
- Rodriguez, S.K. (1998). *Geologia Urbana da Região Metropolitana de São Paulo*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Sá, N.C. (2004a). *GPS: fundamentos e aplicações*. Apostila didática, IAG/USP. São Paulo: Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- Sá, N.C. (2004b). *Reduções de observações gravimétricas: teoria e prática*. São Paulo: Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- Smith, W.H.F., Wessel, P. (1990). Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55, 293-305.
- Takiya, H. (1991). *Aplicação de métodos quantitativos espaciais a dados geológicos da Bacia de São Paulo*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Talwani, M., Worzel, J.L., Landisman, M. (1959). Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendoncino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, 64, 49-59.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wessel, P., Smith, W.H.F. (2005). *The Generic Mapping Tools (GMT) version 4.1 Technical Reference & Cookbook*. Hawaii: SOEST/NOAA.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J.F., Wobbe, F. (2013). Generic Mapping Tools: Improved version released. *EOS Transactions AGU*, 94, 409-410.