

3.2.2 Interpretação de anomalias gravimétricas

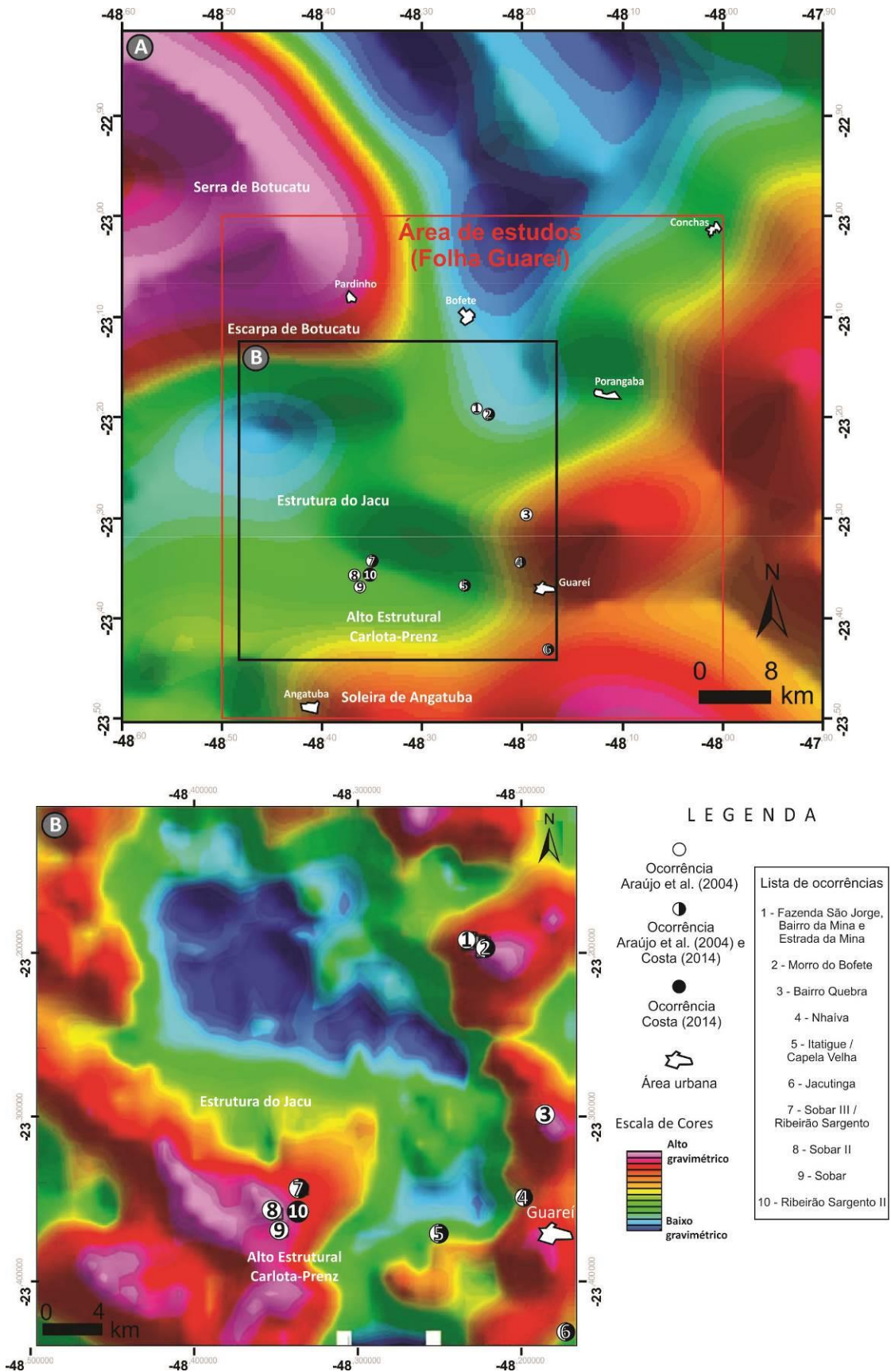
Dentre os dados solicitados a ANP através do BDEP, não estavam disponíveis dados gravimétricos para processamento, manipulação e interpretação. De toda forma, considerando a importância da ferramenta já argumentada no subitem anterior, usou-se de mapas já publicados em outros trabalhos, e dentre os que se enquadraram à escala de detalhe para a área de estudos está o mapa gravimétrico de anomalia Bouguer residual de segunda ordem de Araújo *et al.* (2005), que também é direcionado as ocorrências de arenitos asfálticos no centro-leste paulista (Figura 15).

Notadamente, é sabido que o campo gravimétrico medido reflete os efeitos gravitacionais produzidos por diversas fontes da crosta e do manto, de modo que os autores utilizaram o mapa residual e não regional para minimizar as contaminações mais profundas e do campo gravimétrico regional, acertadamente, já que as ocorrências são aflorantes. Como o mapa de Araújo *et al.* (2005) não abrange toda a área de estudos, utilizou-se também os dados de anomalia Ar Livre (*Free Air*) disponibilizados no sítio do grupo de pesquisa *The Satellite Geodesy research group* do Instituto de Oceanografia da Universidade da Califórnia de São Diego (UCSA). Embora dados de anomalia Ar Livre sejam bastante contaminadas pela topografia, a sua utilização vem apenas para somar de forma visual as anomalias regionais do entorno da área (Figura 15). Foi utilizado o método de curvatura mínima para a gridagem dos dados usando uma célula de 400 m no software Oasis montaj do pacote de programas da Geosoft.

As ocorrências de arenitos asfálticos ocorrem na subida de baixos para altos gravimétricos que tem associação direta com flancos intermediários de estruturas geológicas, como as ocorrências de Sobar em cotas intermediárias entre a Estrutura do Jacu e o Alto Estrutural de Carlota Prenz. O mesmo pode ser observado para as ocorrências no entorno de Guareí e do Morro do Bofete.

No mapa de anomalia residual de Araújo *et al.* (2005), algumas anomalias são mais bem evidenciadas do que no mapa regional de anomalia de Ar Livre, como o Alto Estrutural de Carlota-Prenz. Em contrapartida, as grandes expressões como a Serra de Botucatu ganham destaque, onde a extensão areal do derrame Serra Geral causando uma forte anomalia positiva.

Figura 15 – Mapas de anomalias gravimétrica da área de estudos e adjacências



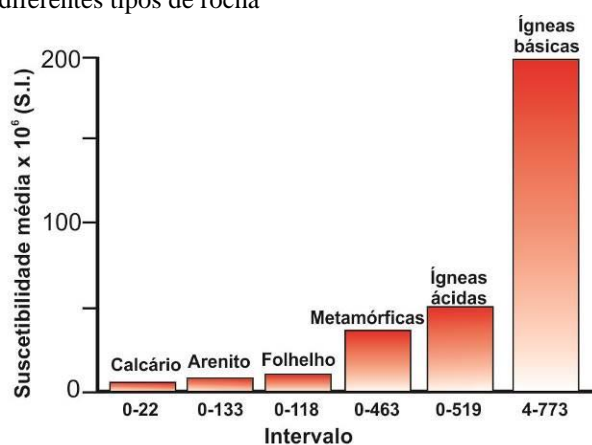
Nota: Em A, anomalia Ar Livre, e em B, anomalia Bouguer residual de segunda ordem.
 Fonte: A foi confeccionado pelo autor, 2015. B foi modificado de Araújo *et al.*, 2005.

3.3 Magnetometria

3.3.1 Generalidades

O levantamento magnético investiga a geologia de subsuperfície com base nas anomalias do campo magnético da Terra resultantes das propriedades magnéticas das rochas. Kearey *et al.* (2009) ressalta ainda que a maior parte dos minerais constituintes das rochas não é magnética, mas certos tipos de rocha apresentam em sua assembleia, minerais magnéticos o suficiente para produzir anomalias significativas. Desse modo, o uso da magnetometria foi crucial na delimitação de corpos de natureza ígnea básica na forma de diques e soleiras de diabásio e derrames basálticos, tendo em vista o seu contraste anômalo magnético com as rochas sedimentares encaixantes (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Gráfico de suscetibilidade magnética para diferentes tipos de rocha



Fonte: Modificado de Kearey *et al.*, 2009, p. 279, figura 7.5.

3.3.2 Interpretação de anomalias magnéticas

A partir da interpretação das anomalias magnéticas correlacionadas com dados de subsuperfície através de poços e furos de sondagem, e de geologia de superfície, foi possível mapear as principais regiões anômalas que podem refletir na existência de soleiras de diabásio na área de estudos, e inferir visualmente os locais em que estas teriam maiores diâmetros de

acordo com a intensidade das anomalias em nT (nanotesla), além das direções preferenciais dos lineamentos magnéticos.

O survey utilizado e requerido junto ao BDEP da ANP, chamado de Projeto Botucatu (Paulipreto, 1980), teve um espaçamento de aquisição das linhas de voo de 2000 m, sob uma direção N-S, com altura de 450 m, e uma amostragem a cada 100 m. Usou-se para a interpolação das amostras em nT uma célula de 400 m no software Oasis montaj do pacote de programas da Geosoft.

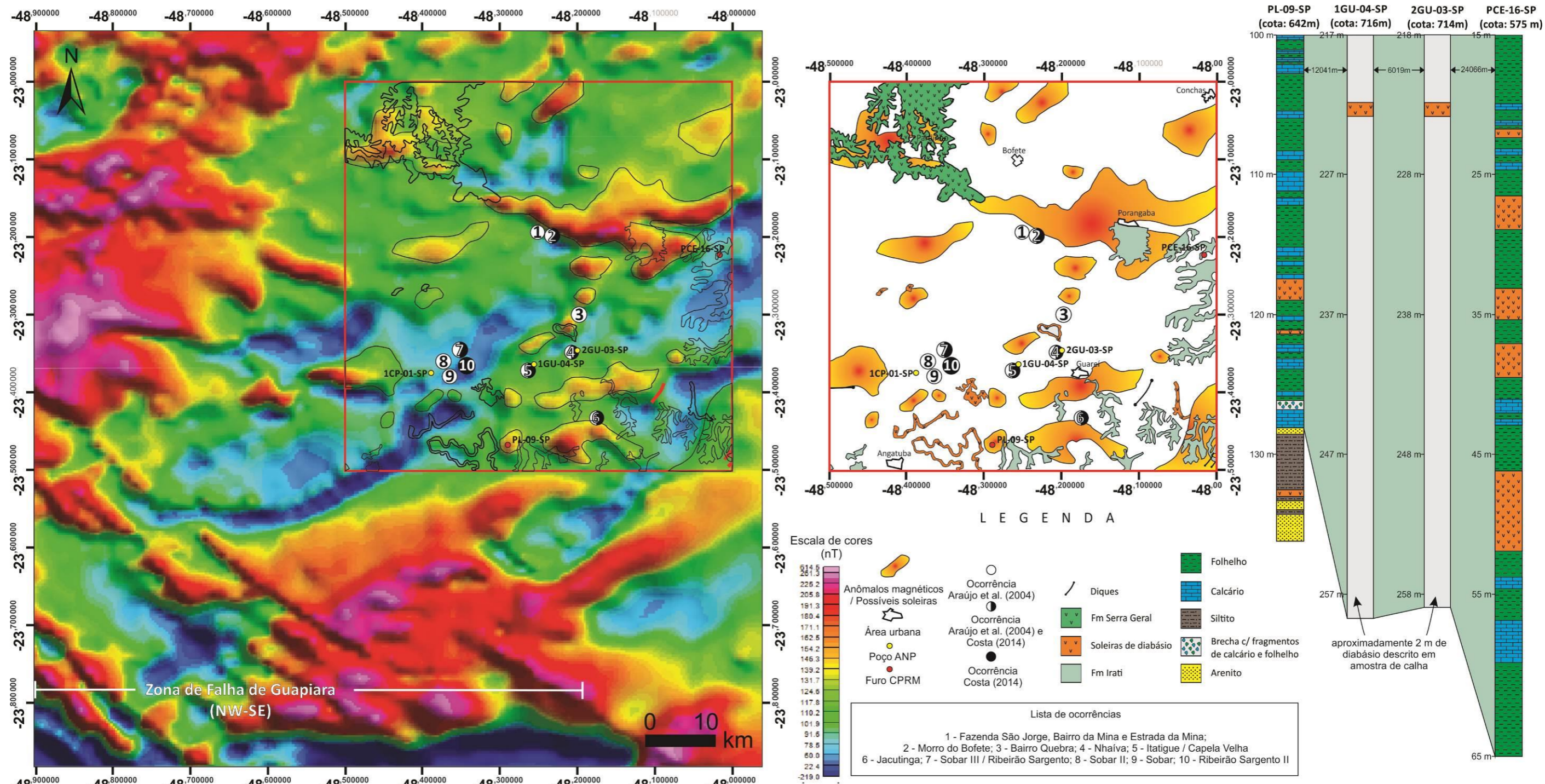
Os resultados permitiram visualizar muito bem a principal estrutura regional que opera sob a área de estudos, a chamada Zona de Falha de Guapiara. A feição é denotada por vários lineamentos de orientação NW-SE caracterizados por fortes anomalias retilíneas e que se repetem lateralmente conjugando uma zona de falha bem marcada. Segundo Zalán (1990), o padrão estrutural das zonas de falhas de direção NW é caracterizado por duas falhas limites com milhares de lineamentos internos e paralelos normalmente preenchidos por diabásio. A presença destes diques caracterizaria as fortes anomalias magnéticas nestes lineamentos, onde houve aproveitamento destas zonas de fraqueza para a injeção dos diques alimentadores das soleiras e derrames basálticos do Juro ao Eo-Cretáceo (Figura 16).

Na área de estudos os lineamentos magnéticos ocorrem como no que tange as estruturas regionais, predominantemente nas direções NW e NE. Todavia há uma inflexão no padrão de lineamentos mais contínuos dado tanto por baixas quanto altas anomalias magnéticas na direção NE a partir da Zona de Falha de Guapiara, inclusive interrompendo-a localmente pelo Lineamento da Falha Guarei. Este padrão poderia denotar e este grupo de lineamentos um caráter mais recente ou subsidiário à Zona de Falha de Guapiara, funcionando como ramificações ou consequência deste sistema estrutural mais importante (Figura 16).

As ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia ocorrem próximas a anomalias de moderado a alto valor, havendo fortes anomalias predominantemente onde afloram os pacotes permianos - que incluem a Formação Irati portadora da rocha geradora - na porção centro-sul e leste-sudeste da área, e claro, na Serra de Botucatu onde já se observa e afloram o derrame Serra Geral com aumento de isópaca de basaltos para o depocentro da bacia.

Os poços 1GU-04-SP e 2GU-03-SP e furos de sondagem PL-09-SP e PCE-16-SP apresentam próximos à superfície em profundidades medidas que vão de 15 a 237 metros, soleiras de diabásio intrudidas nos folhelhos e calcários da Formação Irati. Em somatória, a espessura destas soleiras não excede a 2 metros nos poços 1GU-04-SP e 2GU-03-SP e no furo

Figura 16 – Mapa de anomalias magnéticas da área de estudos



Nota: As anomalias magnéticas ressaltam o padrão regional dos lineamentos de direção NW-SE da Zona de Falha de Guapiara, além de ramificações para NE. A interpretação dos anomalias magnéticos na área de estudos podem ser indicadores de soleiras de diabásio em subsuperfície, o que é corroborado pela observação de soleiras aflorantes (segundo mapa da CPRM editado na figura) próximas e nos poços 1GU-04-SP e 2GU-03-SP, e furos de sondagem PL-09-SP e PCE-16-SP localizados nos mapas e em perfil litológico. Notar também a quantidade de anomalias mapeadas em áreas de ocorrências aflorantes da Fm Irati (geradora), bem como as fortes anomalias de subsuperfícies vinculadas a Serra de Botucatu (presença da Fm Serra Geral).

Fonte: O autor, 2015.

PL-09-SP, E chega a 13,5 m no furo PCE-16-SP. Vale salientar que no furo PL-09-SP também ocorrem soleiras na Formação Palermo com espessura total próxima dos 20 m, o que poderia ser um indicador da anomalia magnética mais forte no local onde foi feito o furo (vide Figura 3.3).

No poço 1CP-01-SP, há a ocorrência de um espesso diabásio de 110 metros, intrudindo o pacote sedimentar do Grupo Itararé, entre as profundidades medidas de 1290 e 1400 m. É perceptível no mapa de anomalias magnéticas que a locação do poço está envolto a uma baixa a intermediária anomalia, o que pode ser reflexo da profundidade em que a soleira se encontra e do pacote de mais de mil metros de sedimento que mascararia o contraste de anomalias.

Tal percepção permitiu concluir que os altos anômalos podem caracterizar soleiras mais rasas que intrudem preferencialmente os pacotes permianos da Formação Irati, já que mesmo com uma espessura de 110 m há valores baixos de suscetibilidade magnética no entorno do poço 1-CP-01-SP.

Algumas dessas anomalias foram verificadas nas linhas sísmicas 2D e serão discutidas no capítulo seguinte.

3.4 Sensoriamento Remoto

3.4.1 Generalidades

Devido ao controle morfotectônico que as estruturas geológicas oferecem como marcadores e modeladores da topografia, os produtos de sensoriamento remoto a partir de imagens **SRTM** (**S**huttle**R**adar **T**opography**M**ission) foram utilizados na obtenção de lineamentos morfoestruturais na área de estudo, afim de se obter um mapa de lineamentos e gerar um modelo digital de elevação (MDE). Desse modo, as unidades da paisagem mapeadas e os aspectos geomorfológicos são reconhecidos e comparados às feições geológicas existentes e expressas na literatura, algumas checadas em campo. Para tanto, usou-se o pacote de softwares que compõe o *ArcView* v.10 que inclui o *ArcMap* e o *ArcScene*.

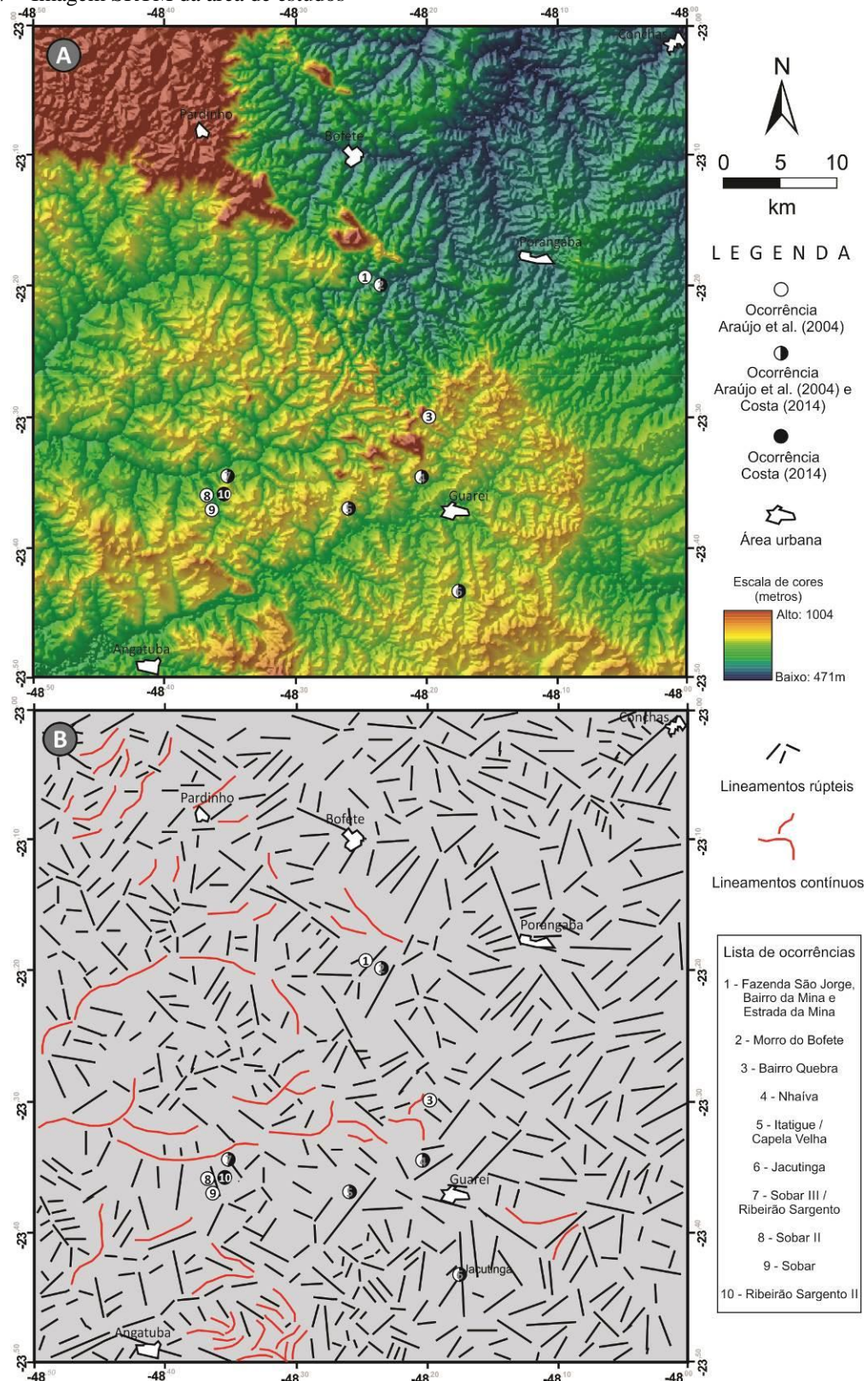
3.4.2 SRTM

Foram feitas sucessivas observações ao longo de toda imagem usando ferramentas como a geração de *Hillshades* (iluminação/sombreamento do relevo) para acentuar a topografia, onde a primeira preocupação neste processo foi separar os lineamentos de acordo com aspectos como continuidade, forma e conjunto (o que determinaria se sua natureza é dúctil ou frágil) e orientação, o que determinaria a predominância de uma família de lineamentos sobre a outra na macroescala.

Na interpretação das imagens SRTM, ficou claro a existência de lineamentos descontínuos com orientações predominantemente NE-SW e NW-SE que ocorrem em toda a área de estudos, subordinados por lineamentos de orientação E-W e raríssimos N-S. A este grupo de lineamentos descontínuos que incluem linhas de drenagem, cristas e vales que denotam certa rugosidade à superfície caracterizando sucessivas e bruscas quebras topográficas, deu-se o nome de **Lineamentos rúpteis** e podem corresponder a sistemas de falhas e juntas e controlam tanto altos quanto baixos topográficos. Ao grupo de lineamentos caracterizados por uma continuidade da feição e exibem certa plasticidade denotada por traçados curvilíneos, deu-se o nome de **Lineamentos contínuos**, que podem corresponder a soleiras de diabásios aflorantes ou relacionados a estruturas particulares quando comparadas ao mapa geológico da Folha Guareí (CPRM). São os casos da estrutura anelar, conhecida como Estrutura de Jacu, e da Soleira de Angatuba (Figura 17).

As cotas na área de estudo variam de 471 m a 1004 m, estas atingidas na Serra de Botucatu, informando que a resolução da SRTM adquirida é de 30x30 m, de modo que estes valores podem oscilar nesse limiar.

Figura 17 – Imagem SRTM da área de estudos



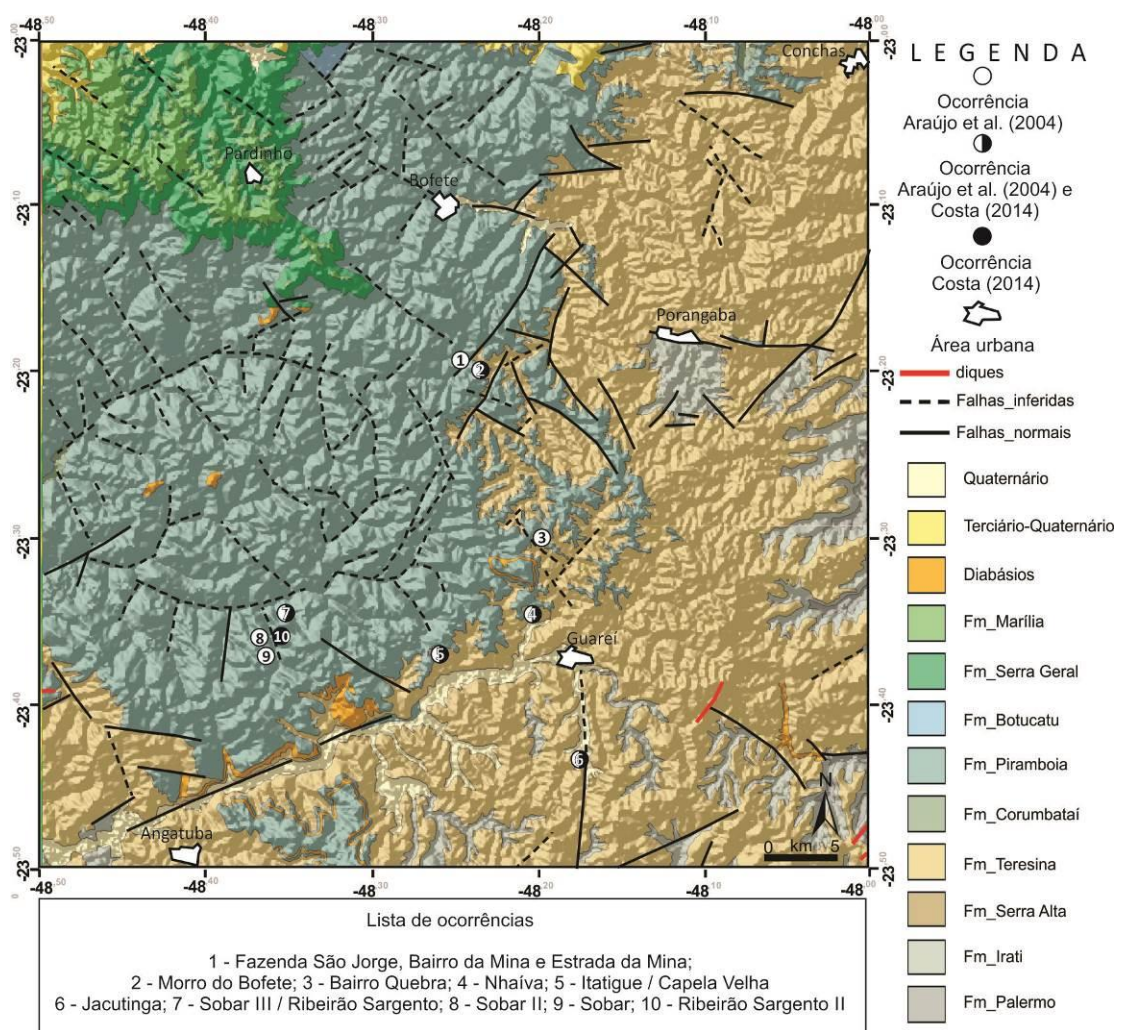
Nota: Em A: imagem SRTM da área de estudos com sombreamento de relevo; Em B: mapa de lineamentos interpretados a partir da imagem SRTM.

Fonte: O autor, 2015.

Quando se sobrepõe a geologia ao modelo sombreado do relevo, fica nítido que há também um controle estrutural dado por falhas e não somente estratigráfico no contato entre a

Formação Piramboia do Triássico com a Formação Teresina do Permiano, bem como da Formação Irati envolta pelas formações Teresina e Serra Alta mais jovens, ressaltando uma dinâmica de falhas normais com deslocamento de blocos. Esses contatos por falhas são notados também nas adjacências das ocorrências de arenitos asfálticos da Formação Piramboia que se localizam nos flancos intermediários entre baixos e altos topográficos, correlacionáveis a baixos e altos estruturais como visto no mapa de anomalias gravimétricas e no mapa geológico (Figura 18).

Figura 18 – Mapa geológico da área de estudos

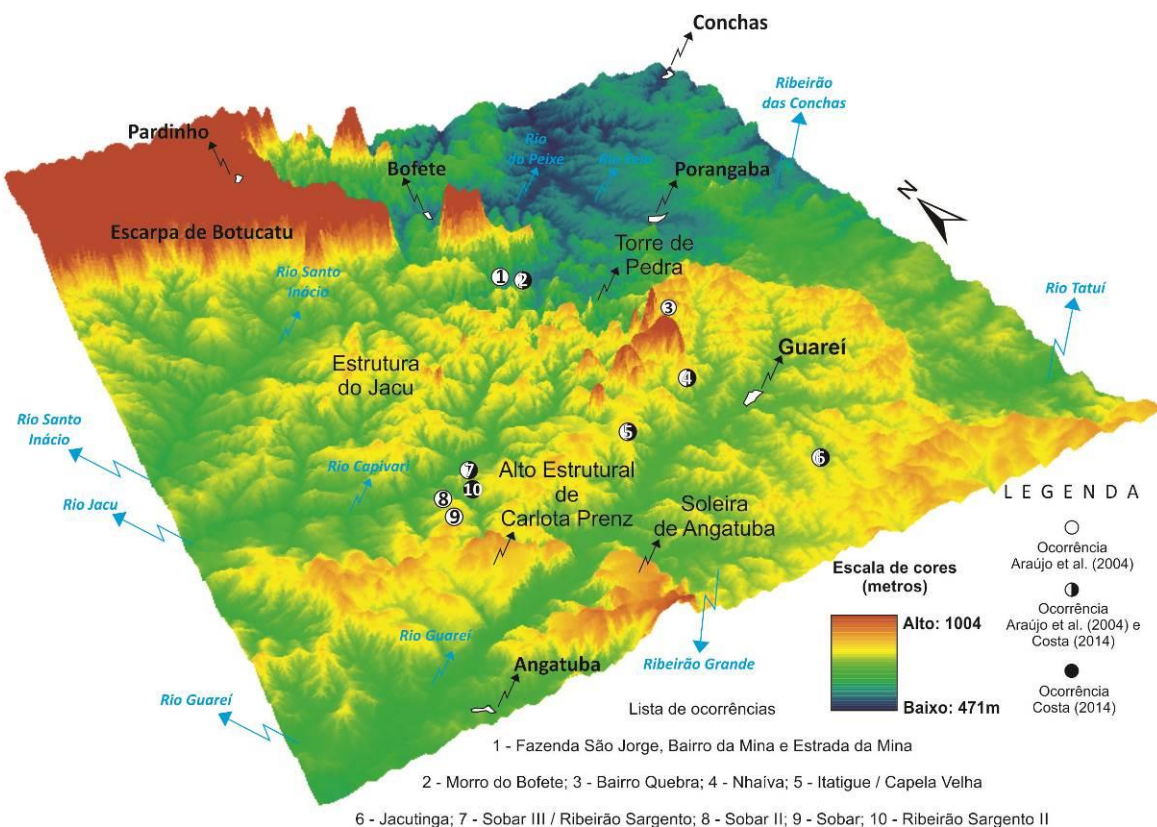


Nota: O mapa geológico da CPRM está sobreposto ao modelo sombreado de relevo.
 Fonte: O autor, 2015.

3.4.3 Modelo digital de elevação (MDE)

A geração de um modelo digital de elevação mesmo que seja um recurso de análise topográfica e, portanto, superficial suscetível e modelado por processos exógenos e antropológicos, consegue evidenciar através de uma visualização tridimensional, a compartimentação estrutural da área de estudos do que o sombreamento do relevo, permitido uma melhor delimitação de altos e baixos estruturais relativos. As baixas cotas são controladas predominantemente por drenagens de rios importantes na área, como o Rio Guareí, Rio Santo Inácio, Rio Jacu, Rio do Peixe e o Rio Feio. O padrão anelar da Estrutura do Jacu também é evidenciado pelo recurso, bem como os altos estruturais e a subida para a Serra de Botucatu (Figura 19).

Figura 19 – Modelo digital de elevação da área de estudos



Fonte: O autor, 2015.

A fim de melhor entender e visualizar a compartimentação dos altos e baixos estruturais relativos foi feito um experimento estabelecendo valores médios para as cotas de cada formação, valores esses extraídos a partir dos dados de poços, e gerado um bloco diagrama a partir do modelo digital de terreno. Partindo da premissa que a unidade

estratigráfica mais antiga aflorante na área de estudos segundo o mapa geológico da CPRM na escala de 1:1000000 é a Formação Palermo da Supersequência Gondwana I, e a mais recente a Formação Marília da Supersequência Bauru, estabeleceu-se, respectivamente, estas como sendo a cota mínima e máxima registrada pela resolução da SRTM. O Quadro a seguir exprime o intervalo das unidades e sua relação com as cotas topográficas usadas no ensaio. Para efeito do experimento excluiu-se os sedimentos terciários e quaternários (Quadro 6).

Quadro 6 – Dados utilizados para o experimento Boco diagrama

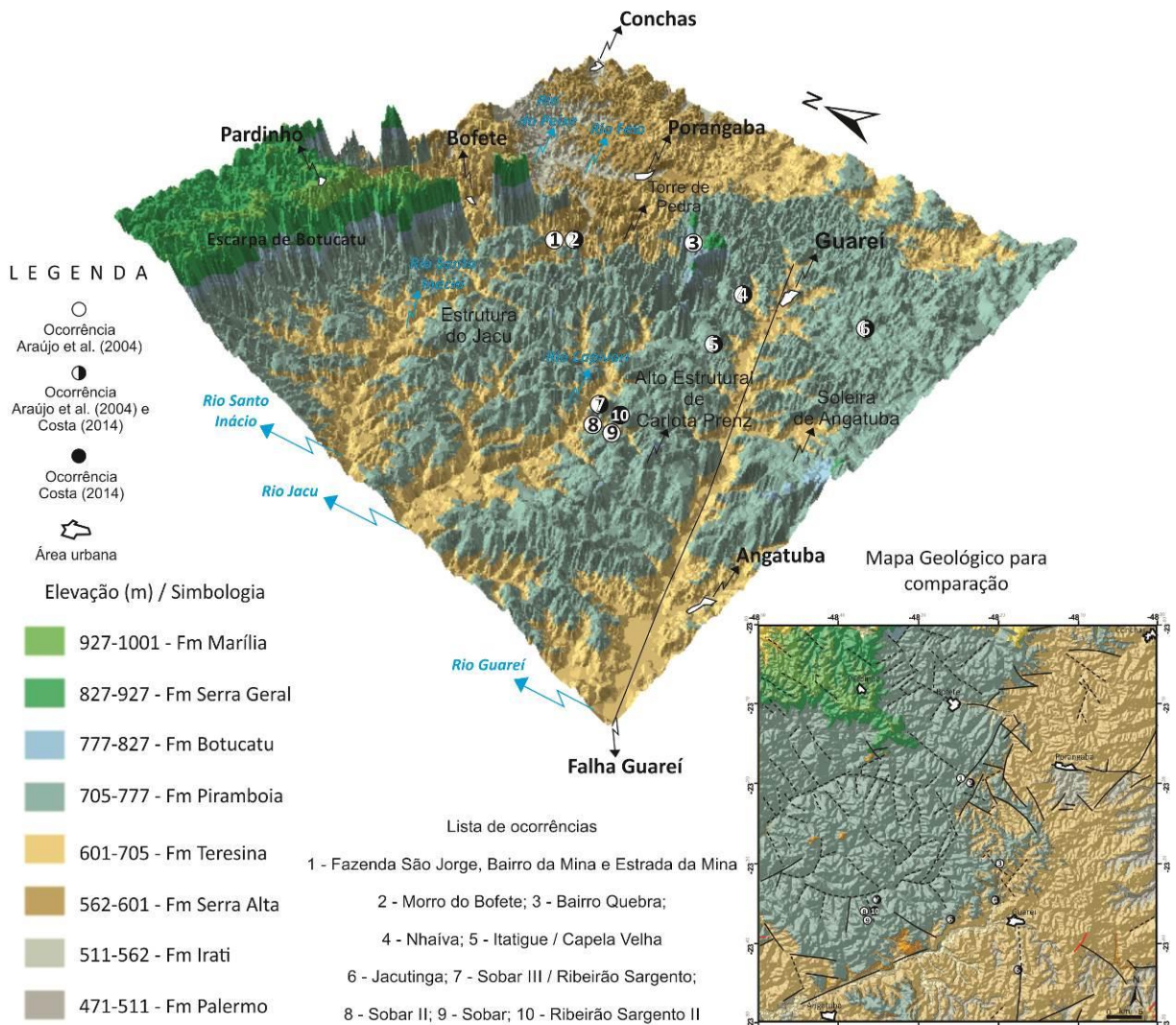
Intervalo de cotas (SRTM)	Unidade Estratigráfica	Espessura média nos poços
927-1001	Formação Bauru	-
827-927	Formação Serra Geral	-
777-827	Formação Botucatu	-
705-777	Formação Piramboia	72
601-705	Formação Teresina	104
562-601	Formação Serra Alta	39
511-562	Formação Irati	41
471-511	Formação Palermo	40

Fonte: O autor, 2015.

Como as formações Bauru, Serra Geral e Botucatu não são registradas nos poços na área de estudos, tentou-se usar os valores do poço adjacente 1-MA-01-SP como referência quantitativa. Entretanto, por se localizar a uma distância de 80 km da área e inserida em outro contexto da bacia, os três horizontes estratigráficos foram calibrados na tentativa a adequar-se ao mapa geológico obtendo uma coerência visual próxima da referência, ou seja, o mapa da Folha Guareí da CPRM.

O experimento admite camadas horizontais e intervalo de cotas constantes para toda a área de estudos, o que só aconteceria na natureza em uma região não estruturada, se enquadrando num modelo perfeito de “bolo de camadas”. É notável que na região onde se deveria aflorar os pacotes do Permiano (formações Teresina, Serra Alta, Irati e Palermo), segundo o mapa geológico, é registrado em sua maioria a Formação Piramboia subordinada pela Formação Teresina. Tal resultado é um indício de que há um controle estrutural da Falha Guareí expressa pelo baixo topográfico dada pela drenagem do rio homônimo, onde a sul da falha localiza-se um bloco alto com predominância aflorante das unidades basais da Supersequência Gondwana I, e a norte um bloco baixo com predominância das unidades superiores da mesma supersequência, as formações Teresina e Piramboia (Figura 20).

Figura 20 – Bloco diagrama resultante do MDE e do Quadro 6



Nota: O bloco diagrama em comparação com o mapa geológico da CPRM não apresenta uma correspondência entre as formações aflorantes a Sul da Falha de Guareí. No bloco afloram as formações Piramboia e Teresina, e no mapa geológico as formações Teresina, Serra Alta, Irati e Palermo.

Fonte: O autor, 2015.

Para verificar a observação, compartimentou-se o bloco diagrama em dois blocos estruturais, chamados aqui de Baixo Estrutural do Jacu e o Alto Estrutural de Guareí-Angatuba, a norte e a sul da Falha Guareí, respectivamente. Admitiu-se as mesmas espessuras do primeiro experimento para o bloco baixo, e para o bloco alto, entretanto, a unidade mais recente aflorante neste bloco é a Formação Piramboia, portanto caracterizando o limite da cota máxima. Evidentemente, as cotas mínimas e máximas do bloco alto são distintas as do bloco baixo, sendo 558 e 848 metros respectivamente, o que configurou outra relação intervalar (Quadro 7).

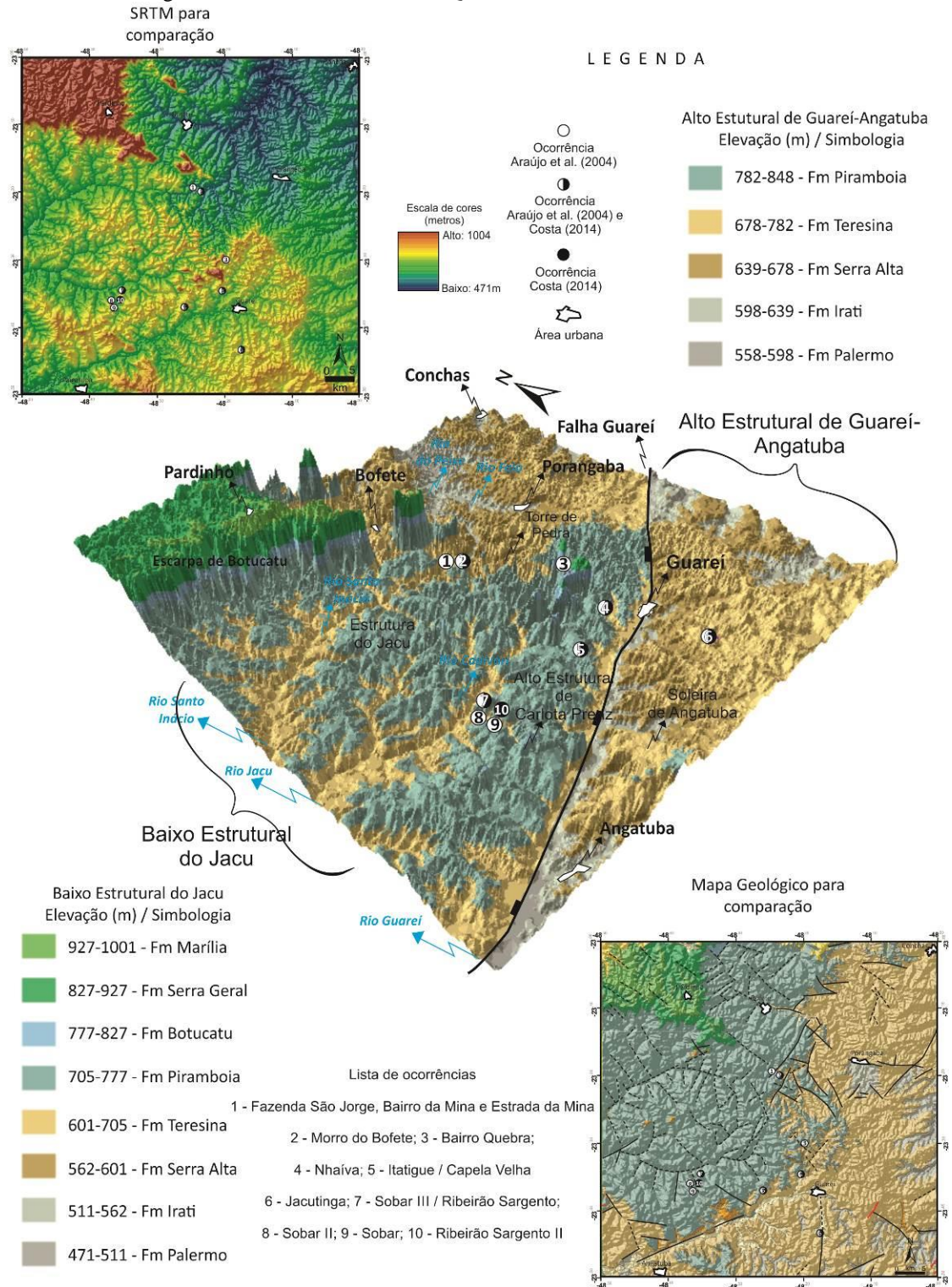
Quadro 7 – Valores inseridos no experimento do bloco diagrama com compartilhamento estrutural da Falha Guareí

Intervalo de cotas (SRTM)	Unidade Estratigráfica	Espessura média nos poços em metros
782-848	Formação Piramboia	72
678-782	Formação Teresina	104
639-678	Formação Serra Alta	39
598-639	Formação Irati	41
558-598	Formação Palermo	40

Fonte: O autor, 2015.

O resultado obtido com a separação dos blocos aproximou-se do mapa geológico da CPRM para área de estudos, enfatizando o controle estrutural da Falha de Guareí, de caráter normal, pondo em contato lateral rochas mais jovens com rochas mais antigas (Figura 21).

Figura 21 – Bloco diagrama resultante do MDE e do Quadro 8



Nota: A compartimentação estrutural deste bloco diagrama em um alto e um baixo estrutural evidenciam o controle estrutural da Falha de Guareí no contato da Formação Piramboia com o permiano na área de estudos, aproximando a geologia do experimento à observada no mapa base da CPRM.

Fonte: O autor, 2015.