

Delimitação do Embasamento da Bacia de Taubaté *Basement Delimitation of the Taubaté Basin*

Ancilla Maria Almeida de Carvalho¹ (ancilla.carvalho@ige.unicamp.br),
Alexandre Campana Vidal¹ (vidal@ige.unicamp.br), Chang Hung Kiang² (chang@rc.unesp.br)

¹Departamento de Geologia e Recursos Naturais - Instituto de Geociências - UNICAMP

R. João Pandiá Calógeras 51, CEP 13083-870, Campinas, SP, BR

²Departamento de Geologia Aplicada - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro, SP, BR

Recebido em 17 de agosto de 2010; aceito em 19 de outubro de 2010

RESUMO

Este trabalho consiste na definição do embasamento da Bacia de Taubaté por meio de métodos geoestatísticos, a partir de dados sísmicos, gravimétricos e informações de poços tubulares profundos. As atividades compreenderam a interpretação de onze seções sísmicas dispostas na porção central e nordeste da bacia, com as quais se obtiveram dados sobre as cotas do embasamento e distribuição das principais falhas. O acréscimo de informação foi de 79 poços, que contribuíram como dados novos principalmente na região das cidades de São José dos Campos e Jacareí. A técnica de krigagem com deriva externa foi aplicada utilizando as informações de sísmica e poços como variáveis principais e o mapa gerado pelo levantamento gravimétrico como variável secundária. O contorno do embasamento obtido apresenta alta correlação com as principais falhas e uma melhor definição foi possível na região de São José dos Campos e no extremo norte da bacia, áreas nas quais está presente o maior número de poços.

Palavras-chave: Bacia de Taubaté; Sísmica; Geoestatística.

ABSTRACT

The aim of this study is to define the basement map of the Taubaté Basin applying geostatistics to seismic, gravimetric and deep wells data. The study consisted of the interpretation of eleven seismic sections obtained in the central and northeastern portions of the basin. The altitude of the basement and the distribution of faults was determined based on these sections. New information was obtained from 79 wells located mainly in the regions of São José dos Campos and Jacareí. The method of kriging with an external drift was applied, using seismic and well data as the main variables and the gravimetric map as the secondary variable. The basement contour map obtained has a strong correlation with the main faults. It was possible to obtain a better resolution in the region of São José dos Campos and in the northeast area, where the vast majority of wells are located.

Keywords: Taubaté basin; Seismics; Geostatistics.

INTRODUÇÃO

A Bacia de Taubaté está localizada na porção leste do Estado de São Paulo e apresenta-se como uma feição deprimida entre as serras do Mar e Mantiqueira. Com forma alongada, a bacia possui dimensões aproximadas de 170 km de comprimento e largura média de 25 km, possuindo como extremos os municípios de Jacareí, a sul, e Cruzeiro, a norte (Figura 1).

Diversos trabalhos analisaram a topografia do embasamento com a delimitação dos altos estruturais e principais falhas da Bacia de Taubaté. Os estudos iniciais foram realizados com informações de campo e dados de poços. Um desses estudos, realizado pelo DAEE (1977), propõe a compartimentação da bacia em seis sub-bacias, Parateí, Jacareí, Eugênio de Melo, Tremembé, Lorena e Cruzeiro, divididas pela Falha de São José e por quatro altos estruturais do embasamento, denominados de Alto do Rio Putins, Alto de Caçapava, Alto de Aparecida e Alto de Cachoeira

Paulista (Figura 2). Mesma configuração foi adotada por Hasui e Ponçano (1978), porém esses autores não adotaram o Alto de Cachoeira Paulista e, com isso, a delimitação da sub-bacia de Cruzeiro.

Com base em seções sísmicas, Marques (1990) reconhece na porção central e nordeste da bacia quatro depocentros individuais denominados de sudoeste para nordeste de Eugênio de Melo, Quiririm, Roseira e Lorena (Figura 3A). As sub-bacias Parateí e Jacareí, porção sul da bacia, não foram amostradas pela sísmica, e segundo o autor se revelam depocentros pouco expressivos. Foram reconhecidos também três altos estruturais: Alto de Caçapava, da Capela de N. S. do Socorro e da Capela de Santa Luzia que correspondem, respectivamente, aos altos de Tremembé, Lorena e Cruzeiro, definidos pelo DAEE (1977).

Padilha et al. (1991) utilizam dados gravimétricos compilados por Galli, Blitzkow e Sá (1988) para a modelagem gravimétrica de um perfil NNW passando pela cidade de Taubaté, com o qual inferiram uma espessura máxima de

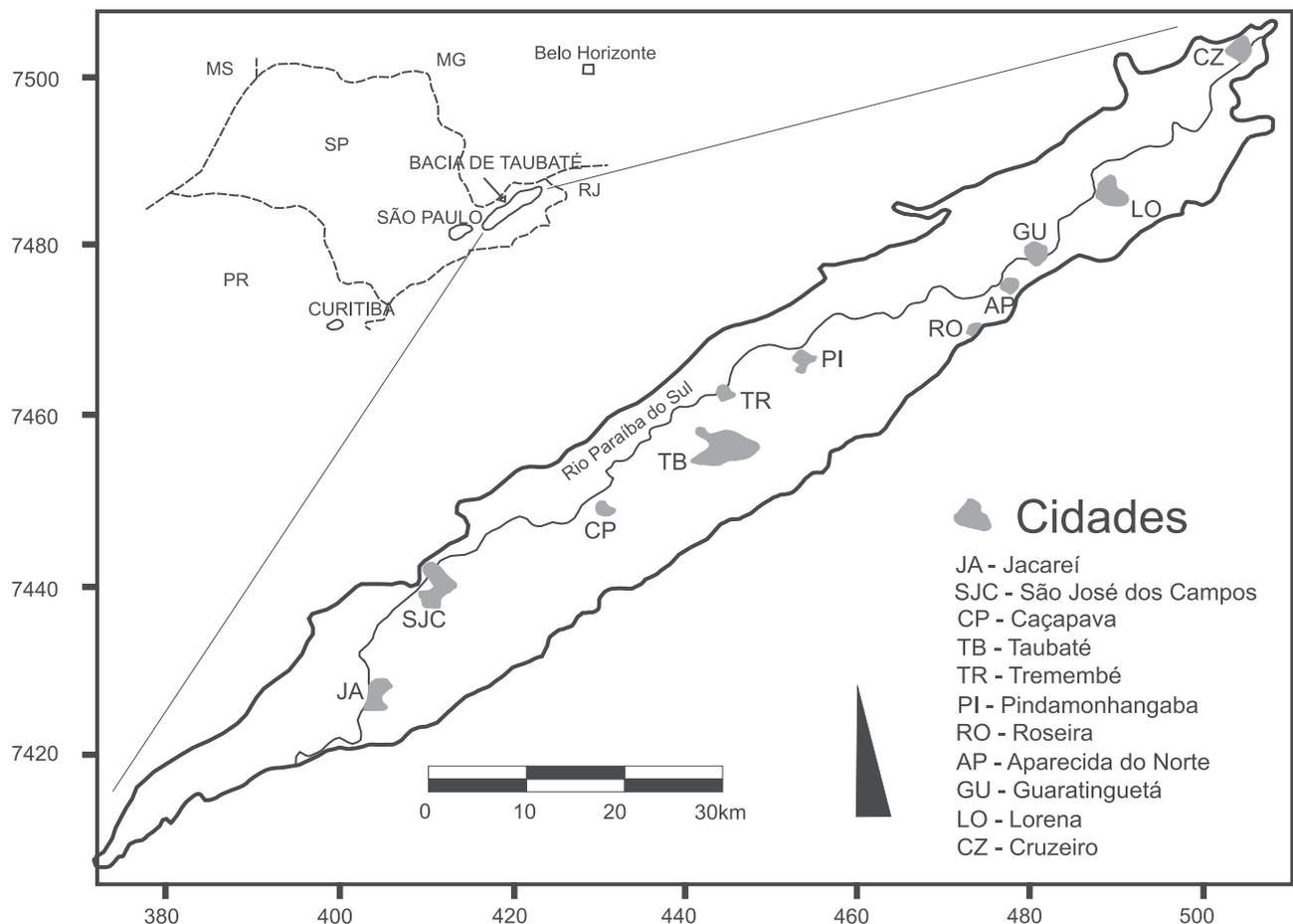


Figura 1. Mapa de localização da área em estudo. Em destaque a localização da Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo.

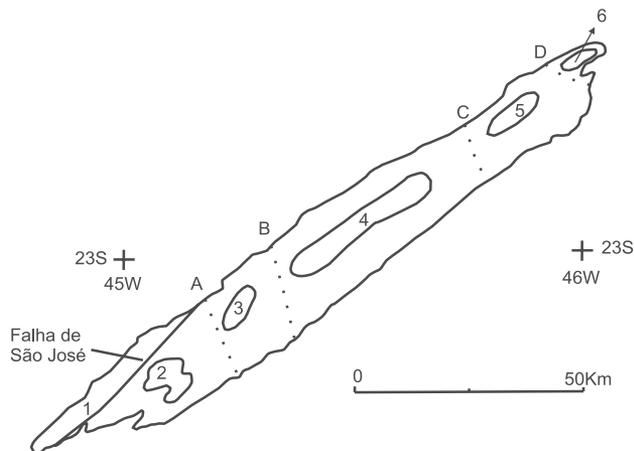


Figura 2. Compartimentação estrutural da Bacia de Taubaté. Na figura estão representadas as sub-bacias pelos números: **1.** Parateí, **2.** Jacareí, **3.** Eugênio de Melo, **4.** Tremembé, **5.** Lorena, **6.** Cruzeiro. As letras representam os altos estruturais: **A.** Rio Putins, **B.** Caçapava, **C.** Aparecida, **D.** Cachoeira Paulista (Modificado de DAEE, 1977).

1.200 m de sedimentos para a Bacia de Taubaté. Os autores também realizaram medidas magnetotélúricas, caracterizando duas camadas elétricas: uma superior altamente condutiva, representada pelos sedimentos da bacia; e uma inferior muito espessa e resistiva representada pelo embasamento cristalino pré-cambriano. Os resultados foram ainda relacionados aos modelos de evolução tectônica propostos para a Bacia de Taubaté (Almeida, 1976; Asmus e Ferrari, 1978) e sugeriram que o mecanismo relacionado à formação da bacia não se originou de uma anomalia térmica profunda na região. Os autores propõem através desse trabalho um modelo transtensional para a Bacia de Taubaté.

Ao interpretar as seções sísmicas utilizadas por Marques (1990), porém com grande número de dados gravimétricos, Fernandes (1993) identifica quatro sub-bacias, denominadas de Parateí, Jacareí-São José dos Campos, Quiririm-Taubaté e Aparecida-Lorena. O autor identifica também três altos estruturais, definidos como zonas de transferências, nomeados de Falha de São José, Alto de Caçapava e Alto de Pindamonhangaba, que delimitam segmentos com alternância de depocentros ao longo de seu eixo. Em trabalhos mais recentes Fernandes e Chang (2001, 2003) propõem a subdivisão da bacia em três compartimentos denominados, de sudoeste para nordeste, como São José dos Campos, Taubaté e Aparecida. Os altos estruturais são representados pelos altos de Caçapava e Pindamonhangaba (Figura 3B).

A maioria dos trabalhos referentes ao estudo do embasamento da Bacia de Taubaté não congrega todas as informa-

ções disponíveis para a análise, como também não apresenta métodos de integração de diferentes variáveis para a caracterização do embasamento. Este texto visa fornecer a melhor compreensão da topografia do embasamento da Bacia de Taubaté, com base nas informações utilizadas em trabalhos anteriores, na incorporação de dados de 79 poços e na aplicação de método geoestatístico que categoriza a base de dados ao atribuir diferentes pesos para cada variável.

A melhor caracterização da topografia do embasamento para os compartimentos da Bacia de Taubaté tem implicação direta para a compreensão da evolução geológica da bacia.

GEOLOGIA

A Bacia de Taubaté faz parte de um conjunto de bacias pertencentes ao *Rift* Continental do Sudeste do Brasil - RCSB - (Riccomini, 1989), uma feição tectônica de idade cenozoica, que se desenvolve entre as cidades de Curitiba, no Paraná, e Barra de São João, no Rio de Janeiro. O RCSB apresenta-se como uma faixa estreita e deprimida, alongada segundo a direção ENE, possuindo extensão de pouco mais de 900 km (Riccomini, Sant'anna, Ferrari, 2004).

Posicionada no segmento central do RCSB, a Bacia de Taubaté está relacionada à tectônica distensiva de idade paleógena, e sua forma alongada está condicionada por descontinuidades antigas de direção geral ENE do embasamento, que favoreceram uma tectônica ressurgente (Fernandes, 1993).

A bacia assenta-se sobre rochas ígneas e metamórficas do Cinturão de Dobramentos Ribeira, datadas desde o Paleoproterozoico até o Neoproterozoico (Hasui e Ponçano, 1978) e seu arcabouço é formado por semigrábens separados por zonas de transferências ou de acomodação, com depocentros invertidos, em típica geometria de bacia do tipo rifte.

O embasamento pré-cambriano da Bacia de Taubaté corresponde às rochas do Grupo Açungui, subdividido em Complexo Embu e Complexo Pilar. O substrato da Bacia de Taubaté é representado predominantemente pelo Complexo Embu, constituído principalmente por migmatitos homogêneos, oftálmicos, neolíticos e facoidais, com intercalações de metassedimentos referidos ao Complexo Pilar, além de corpos metabásicos (Fernandes, 1993).

A Bacia de Taubaté apresenta uma sedimentação tipicamente continental e, segundo Riccomini (1989), o preenchimento pode ser dividido em duas fases: a primeira, sin-tectônica ao rifte, com a deposição dos sedimentos do Grupo Taubaté, composto pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo e a segunda, posterior à tectônica diastrófica, com a deposição da Formação Pindamonhangaba e depósitos aluviais e coluviais (Figura 4).

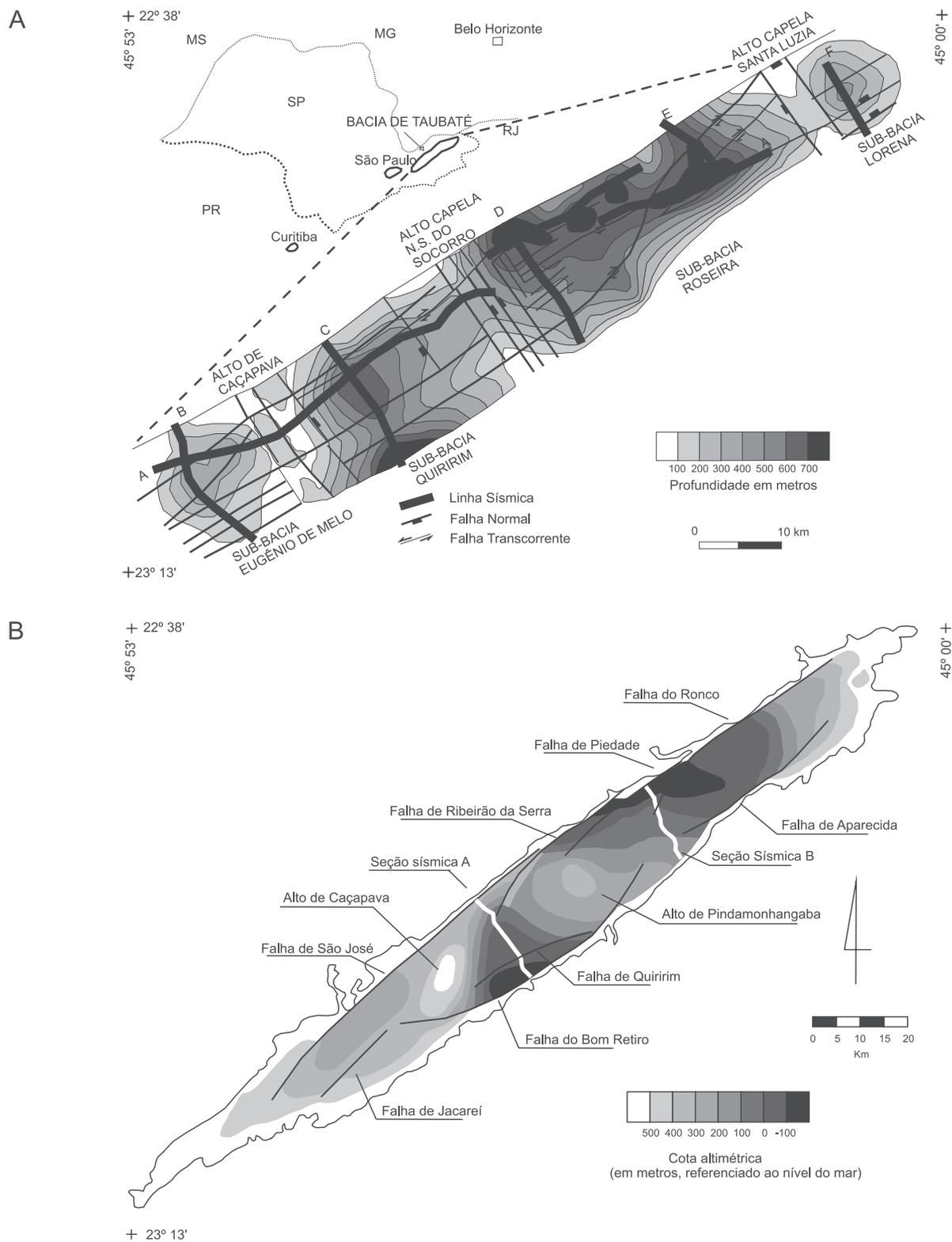


Figura 3. A. Mapa estrutural sísmico em profundidade do embasamento da Bacia de Taubaté (Modificado de Marques, 1990). **B.** Mapa estrutural da Bacia de Taubaté, baseado em dados gravimétricos (Modificado de Fernandes e Chang, 2003).

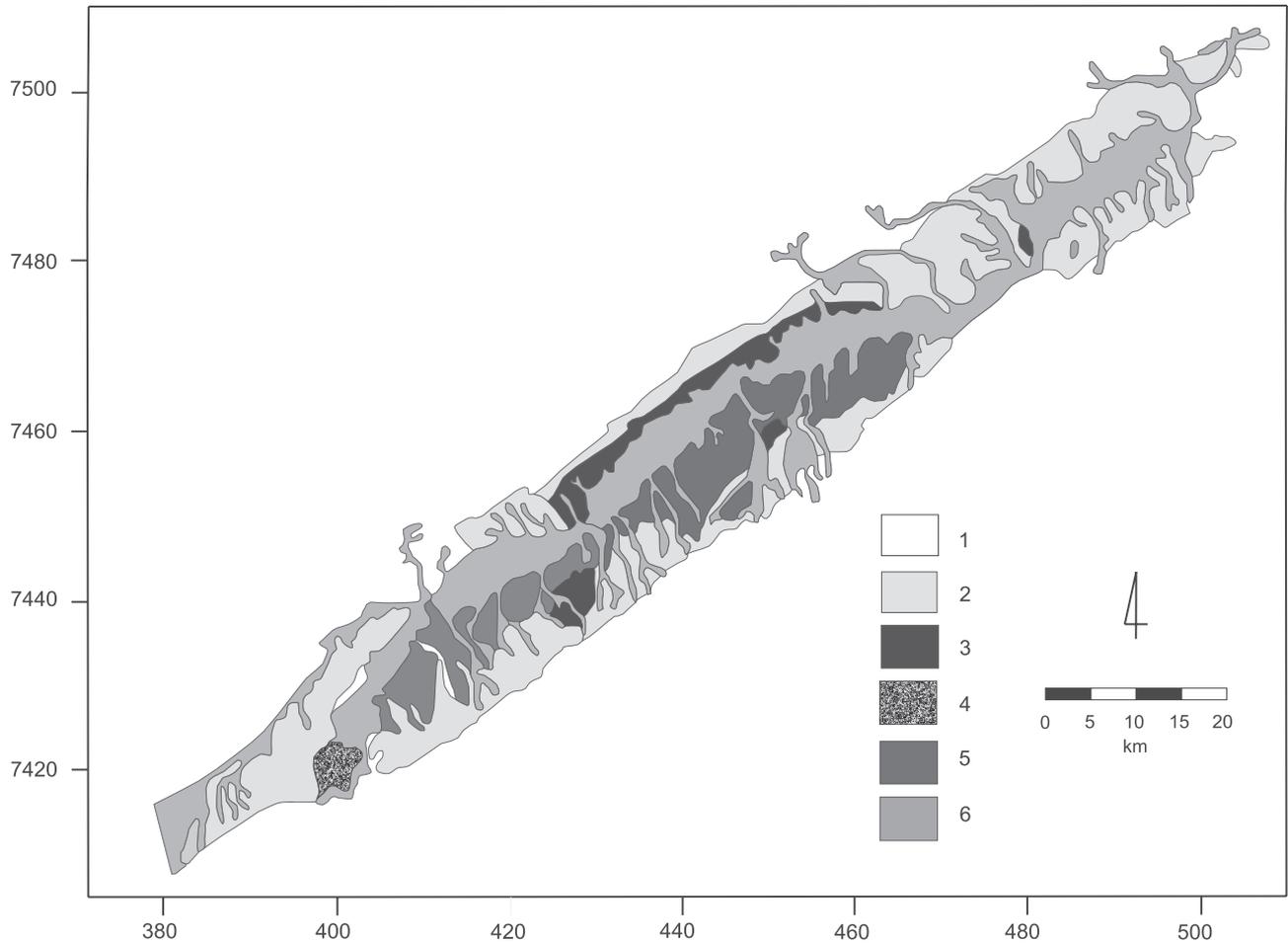


Figura 4. Mapa geológico esquemático da Bacia de Taubaté. **1.** Rochas do embasamento. **2.** Formação Resende. **3.** Formação Tremembé. **4.** Formação São Paulo. **5.** Formação Pindamonhangaba. **6.** Sedimentos quaternários (Modificado de Riccomini, 1989).

A evolução sedimentar sin-tectônica compreende um sistema de leques aluviais associados à planície fluvial de rios entrelaçados colocados na base e nas porções laterais da bacia, representado pela Formação Resende, bem como um sistema lacustre registrado na porção central da bacia, representado pela Formação Tremembé. São descritos também depósitos ligados a sistema fluvial meandrante, referentes à Formação São Paulo.

A segunda fase de preenchimento sedimentar é representada por um sistema fluvial meandrante instalado na porção central da Bacia, referente aos sedimentos da Formação Pindamonhangaba, assim como uma vasta gama de depósitos colúvio-aluviais do Pleistoceno.

Os depósitos da Formação Resende são os mais abundantes e compreendem grande parte do pacote sedimentar paleogênico. Esta unidade é formada por orto e paraconglomerados nas áreas proximais e lamitos nas porções

medianas e distais dos leques aluviais, além de arenitos fluviais em rios entrelaçados axiais às bacias (Riccomini, Sant'anna, Ferrari, 2004).

O sistema de leques aluviais da Formação Resende grada lateral e verticalmente para o sistema lacustre do tipo *playa-lake* da Formação Tremembé, presente na porção central da Bacia de Taubaté (Riccomini e Coimbra, 1992). A partir de dados de sondagens e afloramentos, as principais litofácies reconhecidas na Formação Tremembé compreendem: argilitos verdes maciços, ritmos de folhelhos e margas, dolomitos e arenitos (Riccomini, Sant'anna, Ferrari, 2004).

A Formação São Paulo, unidade de topo do Grupo Taubaté, é representada por depósitos sedimentares relacionados a sistemas fluviais meandrantentes, presente em área restrita na porção sudoeste da Bacia de Taubaté (Riccomini, Sant'anna, Ferrari, 2004).

A Formação Pindamonhangaba corresponde a um sistema fluvial meandrante desenvolvido nas porções central e sudoeste da Bacia de Taubaté, recobrando discordantemente os depósitos da Formação Tremembé, Resende e São Paulo. Esta unidade foi subdividida por Mancini (1995) em dois membros interdigitados: o Membro Rio Pararangaba, representativo das fácies de canal de sistema fluvial meandrante de granulação grossa, e o Membro Presidente Dutra, relacionado à deposição em planície de inundação de sistema fluvial meandrante de granulação fina.

Por meio de análise de estruturas tectônicas e suas relações estratigráficas com o preenchimento sedimentar, Riccomini (1989) elaborou um modelo tectônico para o segmento central do RCSB, em que conclui que a formação da depressão original do rifte teria ocorrido no Paleógeno, sob a ação de um campo de esforços distensivos, de direção NNW-SSE, causador da reativação, como falhas normais, de antigas zonas de cisalhamento proterozoicas de direção NE a ENE. A sustentação deste modelo é inferida pelo caráter normal das falhas mestras ativas durante a instalação do segmento central do RCSB, pelas direções de distensão obtidas a partir dos dados de falhas estriadas, sempre em posição ortogonal às falhas de borda das bacias, e também pela contiguidade entre os depósitos de leques aluviais proximais e as áreas fontes vizinhas.

As rochas do substrato do RCSB revelaram a atuação de um regime transcorrente sinistral, com compressão de direção NE-SW e distensão NW-SE, afetando corpos alcalinos neocretáceos, no sul do Estado São Paulo e na região do Gráben de Guanabara. A idade deste evento foi considerada neocretácea a paleocena. Dessa forma, o regime transcorrente sinistral precederia o distensivo de direção NNW-SSE, este responsável pela instalação das bacias (Riccomini, Sant'anna, Ferrari, 2004).

Zalán e Oliveira (2005) realizam uma análise estrutural do RCSB e denominam-no como Sistema de Riftes Cenozoicos de Sudeste do Brasil (SRCSB), definindo um modelo de evolução genética. Os autores propõem que as altitudes atuais das montanhas circundantes do SRCSB foram resultados de dois episódios de alçamento. O primeiro pulso (entre 85 - 65 Ma) teria natureza regional e epirogenética, relacionado à passagem da Placa Sul Americana por uma anomalia térmica, soerguendo, dessa forma, a Serra do Mar Cretácea de maneira maciça e uniforme, que passou então a constituir um megaplanalto de cerca de 300.000 km² de área. Após cessado o soerguimento deste megaplanalto ocorreu o nivelamento por uma superfície de aplainamento.

O segundo pulso não foi de natureza ascensional, mas de colapso. A Serra do Mar Cretácea constituía um planalto maciço com flanco leste abrupto e grande desnível em relação às bacias adjacentes. Conforme a subsidência ba-

cial progredia, gerou-se uma instabilidade isostática levando ao colapso gravitacional do megaplanalto no final do paleoceno. Os falhamentos do megaplanalto atingiram grandes profundidades trazendo material mantélico juvenil à superfície e iniciou-se o aprisionamento de depósitos clásticos nos grábens formados. O colapso continuou no Neo-eoceno/Oligoceno/Eomioceno, idade da maioria dos depósitos do SRCSB.

MÉTODO DE TRABALHO

O trabalho foi desenvolvido inicialmente através da interpretação de onze seções sísmicas 2D, adquiridas pela PETROBRAS em 1988 e concedidas para o presente trabalho pela ANP - Agência Nacional de Petróleo, as quais se localizam na porção central e nordeste da bacia (Figura 5).

A análise das seções sísmicas foi realizada com auxílio do *software* OpendTect®, que permite a visualização e interpretação de dados sísmicos 2D e 3D. Assumiu-se como expressão sísmica do embasamento cristalino, a mudança do padrão sísmico marcada por um refletor de grande notabilidade, entre reflexões de caráter desordenado e reflexões horizontalmente paralelas, estas representando o preenchimento sedimentar da bacia (Figura 6).

O refletor referente ao embasamento e às principais falhas foi digitalizado e os dados resultantes exportados em formato ASCII, produzindo uma base de dados contendo as coordenadas UTM e os dados em tempo (milissegundo) de cada ponto digitalizado.

Para a integração com os dados do embasamento, adquiridos nas seções sísmicas, foram utilizados dados de 79 poços tubulares profundos, destinados à captação de água subterrânea, contendo informações de profundidade, cota do terreno e cota do embasamento. A base de dados foi adquirida por meio da visita ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que apresentam os dados dos poços localizados na bacia. As informações estão concentradas na porção oeste e nordeste da bacia, com distribuição irregular, havendo maior densidade na região oeste, área que inclui os municípios de Jacareí, São José dos Campos e Caçapava (Figura 5).

Como os dados dos poços apresentam-se por profundidade em metros, foi necessário realizar a conversão tempo-profundidade para a correlação com os dados das linhas sísmicas.

Para os sedimentos da Bacia de Taubaté, Fernandes (1993) adota uma relação utilizando uma velocidade média de 2.000 m/s, que é, aproximadamente, a velocidade utilizada para a seção sedimentar durante o processamento sísmico, fornecendo uma relação de 1 s para 1.000 m, ou 100 ms igual 100 m.

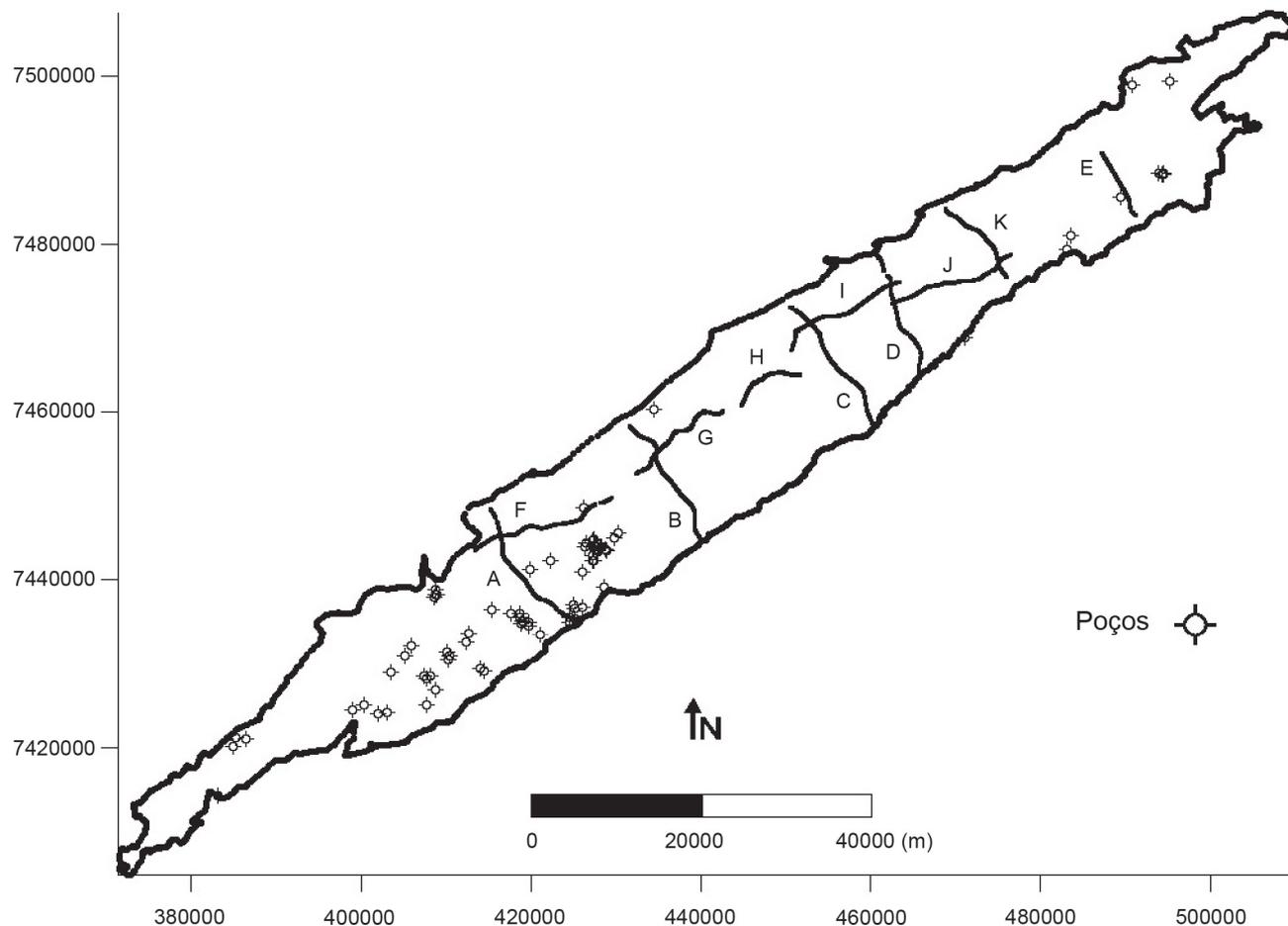


Figura 5. Localização das seções sísmicas e de poços tubulares profundos na Bacia de Taubaté.

Para o presente trabalho buscou-se encontrar uma relação tempo-profundidade utilizando os dados de poços. Dessa forma, foram definidos três poços muito próximos das linhas sísmicas com os quais poderia ser feita uma correlação entre tempo e profundidade do embasamento. A velocidade média obtida para os pontos próximos aos poços foi de 1.214 m/s. Esta velocidade foi utilizada para realizar a conversão tempo-profundidade dos dados sísmicos do topo do embasamento, por meio da relação entre o intervalo de tempo e a distância percorrida.

Em seguida foi realizada a conversão de profundidade para cota altimétrica de todos os dados sísmicos. Para isso foi utilizado um arquivo de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da área onde está inserida a Bacia de Taubaté, constando a cota de toda a superfície da bacia. Com o auxílio do compilador Visual Basic® foi gerada uma rotina de programação que permitiu fazer a conversão.

A base de dados foi completada com as informações do mapa gerado por Fernandes (1993), que utilizou dados de

gravimetria e sísmica. Os dados adquiridos pelo autor totalizam 646 estações gravimétricas distribuídas irregularmente, mas cobrindo toda a extensão da bacia. Como os dados provenientes da sísmica são distribuídos em linha, todas as feições do mapa entre as linhas sísmicas, de toda a bacia, foram definidas pela informação da gravimetria. Por isso, para a incorporação dessa informação, o mapa gerado por Fernandes (1993) foi digitalizado e utilizado para este trabalho como variável secundária.

Os dados foram interpolados utilizando-se o método de krigagem com deriva externa, que permite a estimativa de uma variável primária considerando as informações de uma variável secundária extensivamente amostrada. Esta técnica geoestatística é utilizada em situações em que uma característica de interesse é amostrada esparsamente e uma variável auxiliar ou secundária, linearmente correlacionada com a variável de interesse, é exaustivamente amostrada.

A variável de interesse (primária) é uma medida precisa amostrada, por exemplo, no poço ou sondagem, enquan-

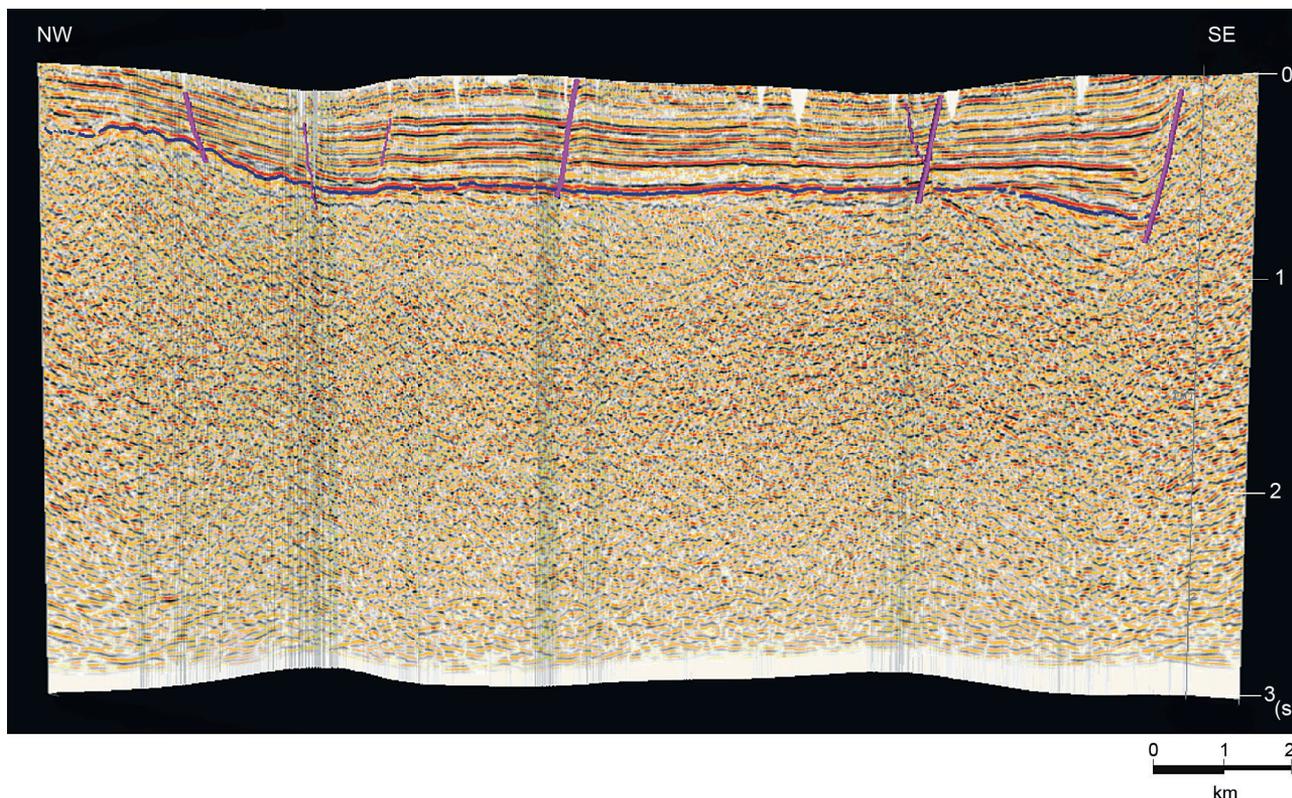


Figura 6. Seção sísmica B, transversal à bacia. O traço horizontal em destaque indica o topo do embasamento e os traços verticais, as principais falhas.

to a variável auxiliar (secundária) é uma medida imprecisa cobrindo o domínio em grande escala (Wackernagel, 2003).

A krigagem com deriva externa é uma técnica de regressão que usa o atributo secundário como tendência para guiar a estimativa da variável primária (Deutsch e Journel, 1992). A variável secundária deve ser conhecida em todo o domínio onde a variável primária será estimada, ou seja, as variáveis auxiliares devem ser multilocalizadas (Fernandes, 2009).

Neste método de estimativa, não existe a necessidade da variável primária ser estacionária, pois a variância espacial utilizada provém dos resíduos entre a variável primária e a variável secundária, que são estacionárias. Porém, a variável primária e a secundária e o modelo de deriva externa devem obrigatoriamente apresentar alto grau de dependência linear (Rocha, Yamamoto, Fonteles, 2009).

Por esse método geoestatístico, considera-se $Z(x)$ como variável primária e $s(x)$ como variável secundária. Ambas as variáveis devem apresentar dependência linear, assim o valor esperado $Z(x)$ é igual a $s(x)$ mais uma constante a_0 e um coeficiente b_1 , conforme escreve Wackernagel (1998):

$$E[z(x)] = a_0 + b_1 s(x)$$

O estimador da krigagem com deriva externa $Z^*(x_0)$ pode ser escrito como:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i)$$

Para que não exista enviezamento, a diferença entre os valores reais e os estimados deve ser igual a zero (Soares, 2000):

$$E[Z^*(x_0) - Z(x_0)] = 0$$

$$E[Z^*(x_0)] = E[Z(x_0)]$$

Sendo assim:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Segundo Bourennane e King (2003), esta equação pode ser desenvolvida como:

$$E[Z^*(x_0)] = \sum_{i=1}^n w_i E[Z(x_i)] =$$

$$a_0 + b_1 = \sum_{i=1}^n w_i S(x_i) = a_0 + b_1 S(x_0)$$

E implica que os pesos devem ser em média consistentes com uma exata interpolação de $s(x)$:

$$S(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i S(x_i)$$

Os valores dos ponderadores são obtidos pela resolução de equações lineares:

$$\sum_{j=1}^n w_j C(x_i - x_j) - u_1 - u_2 S(x_i) = C(x_i - x_0) \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1$$

$$\sum_{j=1}^n w_j S(x_j) = S(x_0)$$

A krigagem com deriva externa consiste na incorporação, dentro do sistema de krigagem, de condições universais suplementares sobre uma ou diversas variáveis com deriva externa $s_i(x)$, $i=1,2,\dots, M$, medida exaustivamente no domínio espacial (Bourennane e King, 2003).

A aplicação do método geoestatístico foi realizada com o auxílio do *software* ISATIS®. Para a estimativa da forma do embasamento da bacia, foram considerados dois semivariogramas representativos da anisotropia dos dados: associados à direção N35E, que possui maior alcance e representa o *trend* da bacia, e o semivariograma associado à direção N55W, que possui menor alcance.

Outro mapa gerado neste trabalho foi o mapa de espessura de sedimento, realizado pela diferença entre os mapa do embasamento e topográfico da superfície do terreno, adquirida a partir de dados SRTM.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente trabalho foi considerada como variável primária a distribuição dos dados sísmicos e de poços;

e como variável secundária, o mapa do embasamento gerado por dados gravimétricos. Para o caso da utilização de uma base de dados contendo diferentes variáveis, o uso conjunto de toda a base sem a atribuição de pesos às variáveis principais pode ocasionar uma estimativa incorreta.

A sísmica 2D existente para a bacia define as principais estruturas, porém apresenta grande espaçamento que impede uma estimativa precisa entre as linhas. Fernandes (1993) utilizou grande número de dados gravimétricos para a melhor estimativa do embasamento, porém como o próprio autor ressalta, esses dados estão sujeitos a fatores como rotação e achatamento da terra, altitude, rugosidade do terreno entre outros. Isto ocasiona o alto grau de incerteza da informação, quando comparado com dados sísmicos e de poços, por isso a utilização como dado secundário.

Este trabalho incorpora informações novas provenientes de 79 poços que atingiram o embasamento. Esses dados juntamente com os dados sísmicos foram considerados como principais.

O mapa obtido neste trabalho revela a existência de quatro depocentros principais na bacia, segundo a denominação proposta por Fernandes e Chang (2003), um depocentro localizado no Compartimento São José dos Campos, outro localizado no Compartimento Taubaté e dois depocentros no Compartimento Aparecida (Figuras 7 e 8).

O segundo depocentro posicionado no extremo norte da bacia foi definido por Marques (1990) como sub-bacia Lorena, separada do resto da bacia pelo alto de Capela Santa Luzia.

Nas extremidades noroeste e sudoeste da bacia, devido à grande ausência de dados, ocorre um erro na estimativa de valores, fornecendo nestas porções resultados menos confiáveis.

A configuração proposta para o Compartimento São José dos Campos é bem caracterizada por conter as linhas sísmicas A, F e informações de 45 poços. O compartimento apresenta cota altimétrica mínima para o embasamento entre 200 e 150 m e está separada da sub-bacia Quiririm pelo Alto de Caçapava, que apresenta cotas em torno de 500 m. A seção sísmica A define um semigráben inclinado para NW, com profundidades para o embasamento variando entre 30 e 400 m aproximadamente, as profundidades mais altas encontram-se próximas à Falha de São José, a principal falha de borda do compartimento. Os resultados obtidos mostram que o depocentro neste compartimento é melhor alinhado à Falha de São José em relação ao mapa proposto por Fernandes e Chang (2003). A configuração do embasamento na área sul desse compartimento é definida apenas por dados de poços.

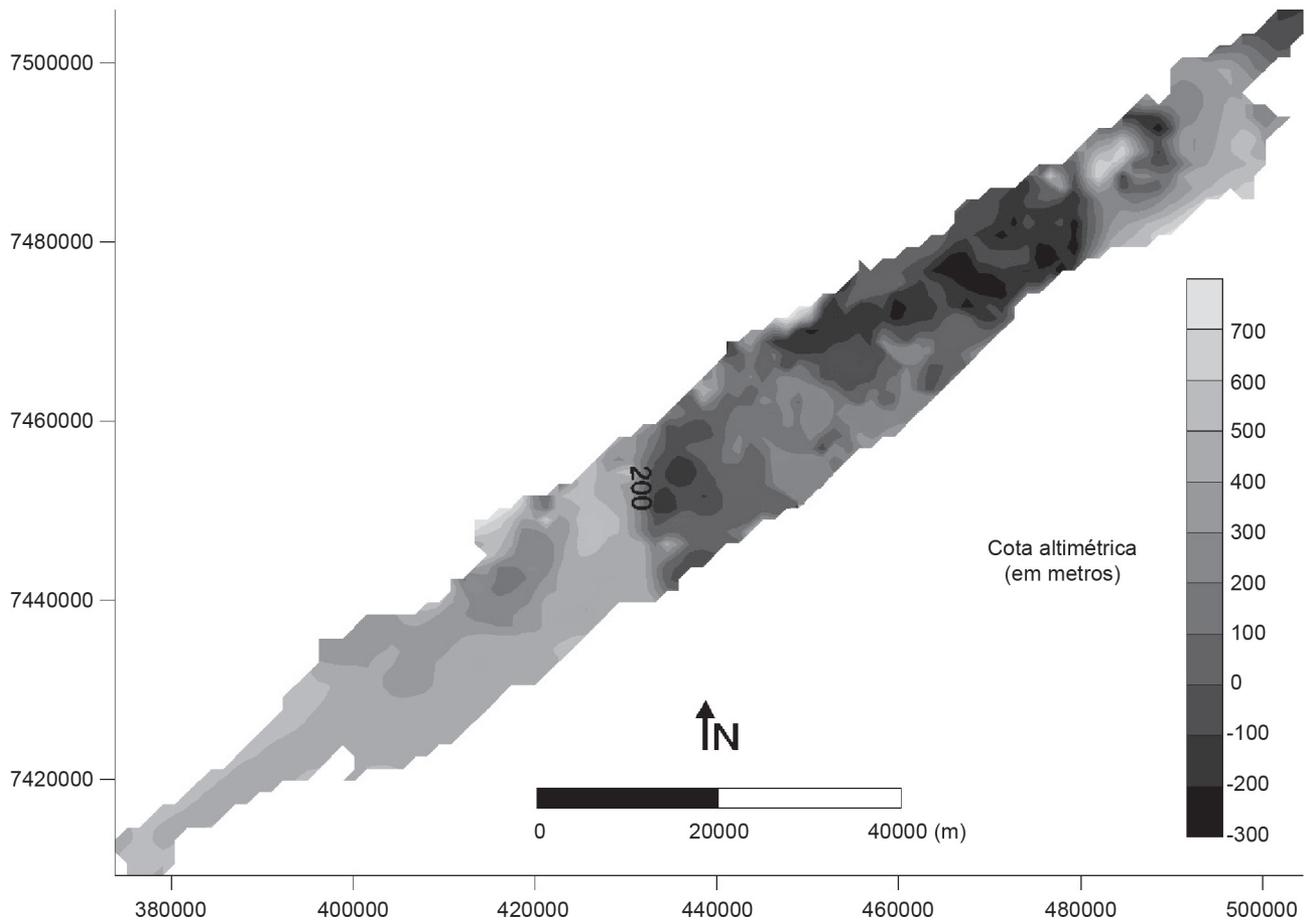


Figura 7. Mapa do contorno do embasamento da Bacia de Taubaté.

A porção centro-sul do Compartimento São José destaca-se pela constância nos valores de profundidade do embasamento, com extensa área com valores entre 50 e 150 m.

A seção sísmica F intercepta a sul a seção sísmica A. A região central da seção apresenta o depocentro bem marcado da bacia, com profundidades próximas a 400 m e, em sua porção nordeste, marca a elevação do relevo em direção ao Alto de Caçapava.

Nota-se pelo mapa que o depocentro que marca o Compartimento São José ocorre de forma alongada, segundo a direção nordeste, e evidencia as feições do semigráben basculado para noroeste, associado à principal falha de borda, e a margem flexural com uma elevação suave do terreno na direção sudeste.

Em direção à porção central, o Compartimento São José é separado do Compartimento Taubaté pelo Alto de

Caçapava, que é fortemente marcado pelas maiores cotas existentes nesta região da bacia.

O embasamento do Compartimento Taubaté, localizado na porção central da bacia, apresenta cota altimétrica mínima em torno de -150 m. Nesta sub-bacia estão localizadas as seções sísmicas B e G. A seção sísmica B apresenta-se como um semigráben inclinado para SE, com profundidades que variam entre 300 e 800 m, marcando a alternância de depocentros da bacia. Esta seção é interceptada em sua porção NW pela seção sísmica G, que apresenta um depocentro bastante acentuado, com profundidades que variam entre 300 e 700 m.

Neste compartimento, os poços que atingiram o embasamento estão situados nas bordas e na região do Alto de Caçapava, e definem anomalias pontuais o que evidencia a ausência de informações para essa região.

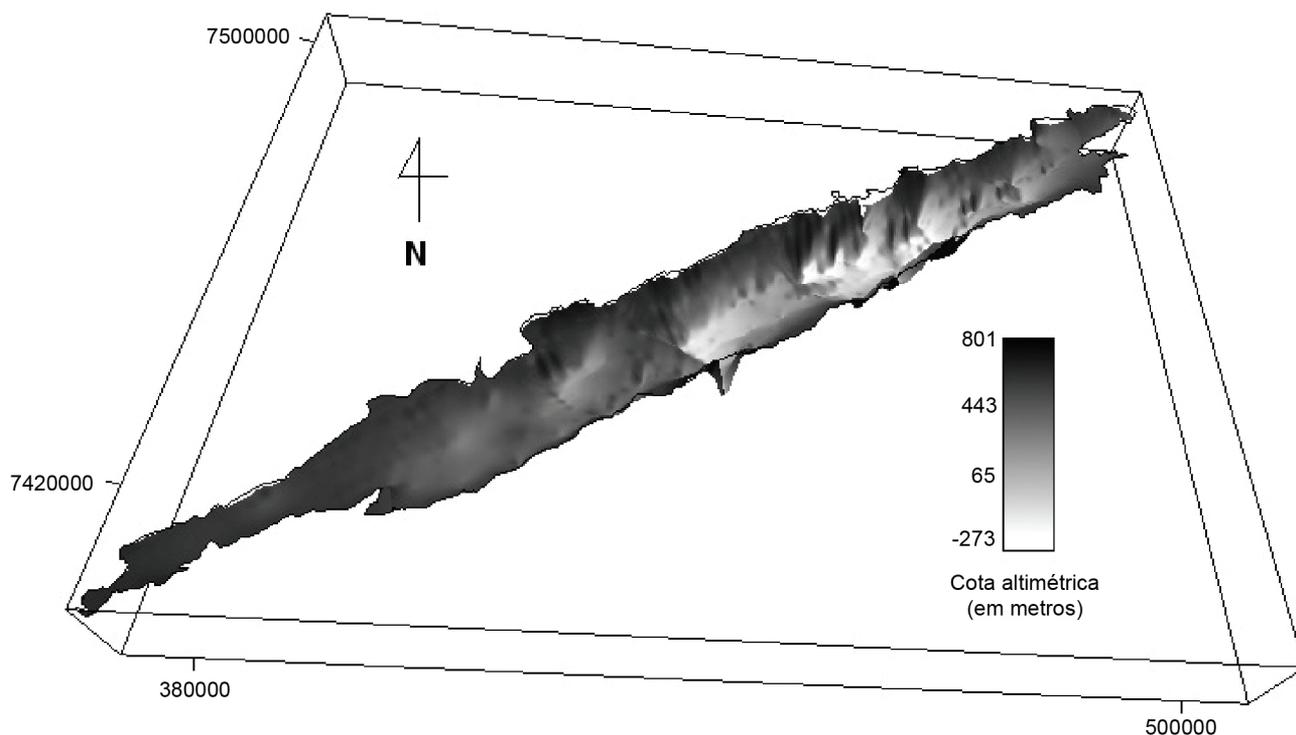


Figura 8. Visualização 3D do contorno do embasamento da Bacia de Taubaté.

O Compartimento de Taubaté se separa a nordeste do Compartimento de Aparecida pelo Alto de Pindamonhangaba. Este alto ocorre com uma elevação menos pronunciada, apresentando cotas em torno de 300 m, e é mais fortemente evidenciado pelo mapa de espessura de sedimentos (Figura 9).

Na porção a nordeste do Alto de Pindamonhangaba observa-se a existência de um extenso depocentro denominado Compartimento Aparecida, com cotas mínimas para o embasamento em torno de -300 m. Esta sub-bacia apresenta as maiores espessuras de sedimentos da Bacia de Taubaté, com a existência de um forte basculamento para noroeste em sua porção sul, deslocando-se para sudeste na porção norte.

Neste compartimento estão localizadas as seções sísmicas C, D, I e J. As seções C e D destacam um semigráben basculado para NW, com profundidades entre 300 e 750 m, e 300 e 650 m, respectivamente. As seções sísmicas I e J apontam o forte depocentro desta sub-bacia, com profundidades entre 550 e 800 m para a seção I e 600 e 800 m para a seção J.

Embora de maior dimensão, este compartimento apresenta poucos poços, com isso a maior parte de sua delimitação está caracterizada pelos dados sísmicos e gravimétricos. Neste compartimento ocorre a maior variabilidade dos valores de cota do embasamento, onde é possível, pela topografia do embasamento, inferir a presença de várias falhas no compartimento.

A principal distinção entre os mapas gerados por Fernandes e Chang (2003) e Marques (1990) está na definição do Alto da Capela de Santa Luzia, que apresenta cotas para o embasamento em torno de 200 e 300 m. A sub-bacia Lorena (Marques, 1990) ocorre na extremidade noroeste da Bacia de Taubaté e apresenta cotas entre -50 e 100 m, aproximadamente. Nesta sub-bacia está localizada a seção sísmica E, que apresenta basculamento para NW com profundidades de até 400 m. Seis poços atingiram o embasamento na região norte da bacia, estes evidenciam a presença desta sub-bacia, embora ocorra elevada variabilidade dos valores. Ao analisar toda a bacia esta região é que apresenta a menor densidade de informação.

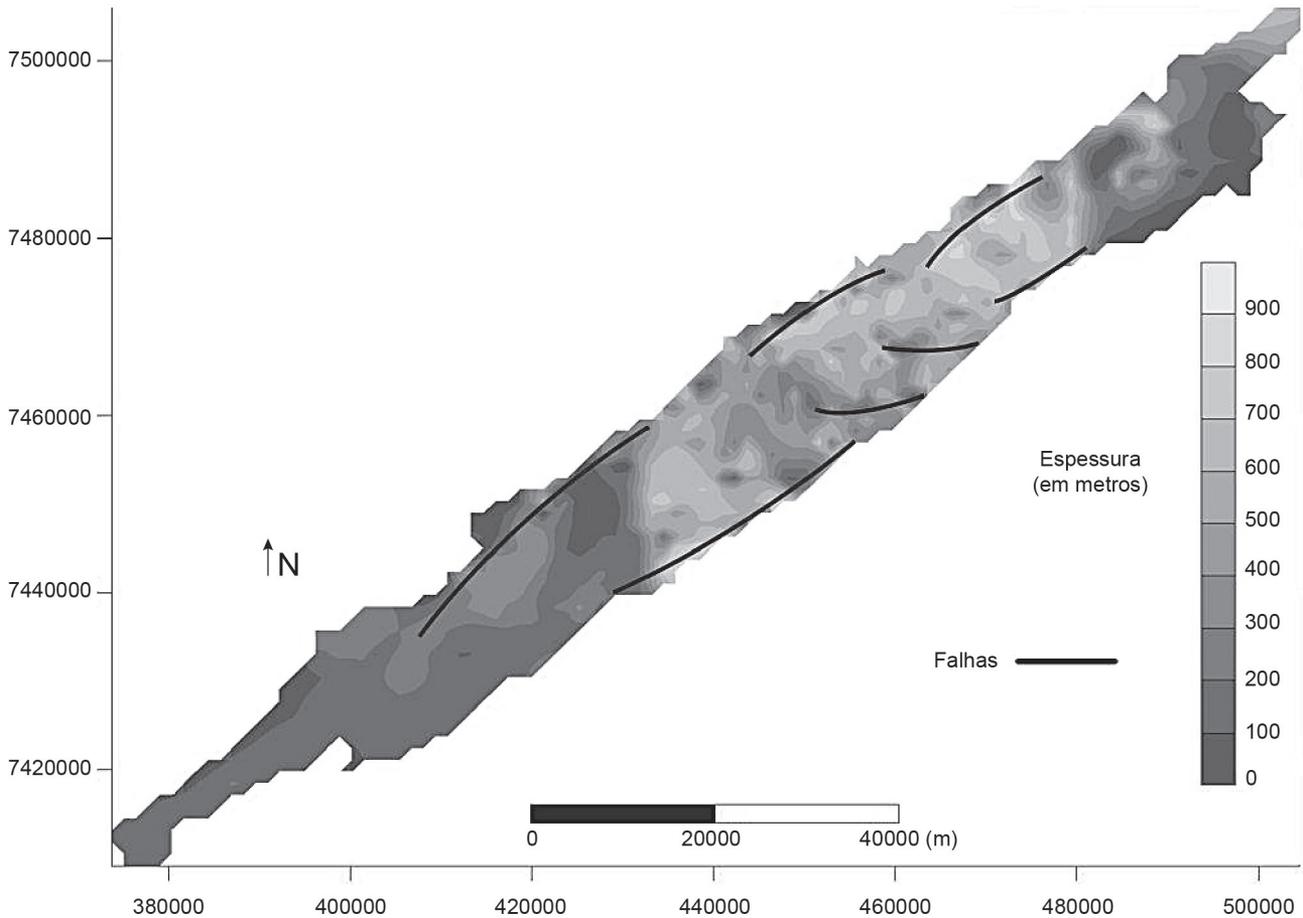


Figura 9. Mapa de espessura dos sedimentos da Bacia de Taubaté.

Ao gerar o mapa de espessura de sedimentos é possível observar melhor as principais estruturas presentes na bacia, com regiões mais profundas na porção central e nordeste da bacia e mais rasas na porção sudoeste. Outra inferência, a partir desse mapa, são as principais falhas de borda delimitadas na Figura 6, distribuição semelhante à definida por Fernandes e Chang (2003).

CONCLUSÕES

Este trabalho visou a formação de uma base de dados sobre o embasamento da Bacia de Taubaté, referente à interpretação de onze seções sísmicas 2D e dados de 79 poços. Com a integração de dados sísmicos, de perfis geofísicos e gravimétricos gerou-se uma quantidade de informações satisfatória para a estimativa do contorno do embasamento da bacia, por meio de métodos geoestatísti-

cos. A interpolação de dados realizada a partir da técnica de krigagem com deriva externa possibilita a utilização de fontes de dados diversas e o estabelecimento de pesos diferenciados para as informações com melhores amostragens, estimando um modelo com maior confiabilidade.

O mapa proposto neste trabalho é semelhante ao definido por Fernandes e Chang (2003), com três compartimentos bem delimitados na porção central da bacia, separados por dois altos estruturais. Entretanto, na porção noroeste da bacia, região de Lorena, há a existência de um quarto depocentro, semelhante ao definido por Marques (1990), porém em região com baixa densidade de informação.

No extremo sudoeste da bacia, região da cidade de Jacareí, nota-se a existência de dois depocentros pouco expressivos, corroborando as informações obtidas no trabalho de DAEE (1977). As principais falhas foram identificadas e o avanço para a melhor caracterização do embasamento

ocorreu no Compartimento São José dos Campos com o acréscimo da informação de 45 poços.

Por meio do mapa obtido percebe-se que a integração de todas as informações disponíveis sobre o embasamento da bacia permitiu uma análise integrada de grande quantidade de dados e reuniu grande parte das propostas definidas para a Bacia de Taubaté. Os dados de poços permitiram um detalhamento maior a partir do mapa proposto por Marques (1990), o qual possui maior semelhança com este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Agência Nacional do Petróleo - ANP, pelo fornecimento de dados sísmicos, e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo - Sabesp, e ao Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, pelo fornecimento de dados de poços tubulares profundos. Agradecimentos também à Opendtect®, pelo fornecimento de *softwares* para a realização do tratamento dos dados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. de. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 48, p. 15-26, 1976. Suplemento.
- ASMUS, H. E.; FERRARI, A. L. Hipótese sobre a causa do tectonismo Cenozóico na região Sudeste do Brasil. In: *Aspectos estruturais da margem continental Leste e Sudeste do Brasil*. Série. Projeto REMAC, n. 4, p. 75-88, 1978.
- BOURENNANE, H.; KING, D. Using multiple external drifts to estimate a soil variable. *Geoderma*, v. 114, p. 1-18, 2003.
- DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 3 (São José dos Campos e Faixa Litorânea)*, SP. São Paulo: DAEE, 1977. 175 p.
- DEUTSCH, C.; JOURNAL, A. *Geoestatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press, 1992. 340 p.
- FERNANDES, F. L. *Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP*. 1993. 147 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 1993.
- FERNANDES, J. A. B. *Krigagem com deriva externa aplicada à avaliação de recursos minerais de calcário e de minério laterítico*. 2009. 60 f. Tese (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- FERNANDES, F. L.; CHANG, H. K. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté - Vale do Rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 19, p. 131-144, 2001.
- FERNANDES, F. L.; CHANG, H. K. Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté - SP. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9., 2003, Búzios. *Boletim de Resumos... Búzios: SBG-Núcleos Rio de Janeiro/ Espírito Santo*, 2003. p. 367-370.
- GALLI, V.; BLITZKOW, D.; SÁ, N. C. Carta gravimétrica do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1988. (Rel. n° 25.645).
- HASUI, Y.; PONÇANO, W. L. Organização estrutural e evolução na Bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. *Anais... Recife: SBG*, 1978. v. 1, p. 368-381.
- MANCINI, F. *Estratigrafia e aspectos da tectônica deformadora da Formação Pindamonhangaba, Bacia de Taubaté, SP*. 1995. 107 f. Tese (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- MARQUES, A. Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo, Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 4, n. 3, p. 253-262, 1990.
- PADILHA, A. L.; TRIVEDI, N. B.; VITORELLO, Í.; COSTA, J. M. Geophysical constraints on tectonic models of Taubaté Basin, southeastern Brazil. *Tectonophysics*, v. 196, p. 157-172, 1991.
- RICCOMINI, C. *O rift continental do sudeste do Brasil*. 1989. 304 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M. Geologia da bacia sedimentar. In: NEGRO JR, A.; FERREIRA, A. A.; ALONSO U. R.; LUZ, P. A. (Ed.). *Solos da Cidade de São Paulo*. São Paulo: ABMS/ABEF, 1992. p. 37-94.
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; et al. (Ed.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, São Paulo: Beca, 2004. cap. 23.

ROCHA, M. M.; YAMAMOTO, J. K.; FONTELES, H. R. N. Cokrigagem ordinária VS. Krigagem com deriva externa: Aplicações para a Avaliação do nível potenciométrico em um aquífero livre. *Geologia USP: Série Científica*, São Paulo, v. 9, p. 73-84, 2009.

SOARES, A. *Geoestatística para ciências da terra e do ambiente*. Lisboa: I.S.T. Press, 2000. 206 p.

WACKERNAGEL, H. *Multivariate geostatistics*. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 291 p.

WACKERNAGEL, H. *Multivariate geostatistics*. 3. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 387 p.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v.13, n. 2, p. 269-300, 2005.