



NÚMERO: 435/2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ANCILLA MARIA ALMEIDA DE CARVALHO

**CARACTERIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS FLUVIAIS DA
BACIA DE TAUBATÉ, SP.**

TESE APRESENTADA AO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DA UNICAMP COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE MESTRE EM
GEOCIÊNCIAS.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Campane Vidal

Este exemplar corresponde à versão final da Tese
defendida pela aluna, e orientada pelo Prof. Dr.

CAMPINAS – 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR
CÁSSIA RAQUEL DA SILVA – CRB8/5752 – BIBLIOTECA “CONRADO PASCHOALE” DO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
UNICAMP

C253c Carvalho, Ancilla Maria Almeida de, 1980-
Caracterização de reservatórios fluviais da Bacia de
Taubaté, SP / Ancilla Maria Almeida de Carvalho--
Campinas,SP.: [s.n.], 2011.

Orientador: Alexandre Campana Vidal.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Instituto de Geociências.

1. Bacias (Geologia) – Taubaté (SP). 2. Geofísica.
3. Geologia – Métodos estatísticos. I. Vidal, Alexandre
Campana, 1969- II. Universidade Estadual de Campinas,
Instituto de Geociências. III. Título.

Informações para a Biblioteca Digital

Título em inglês: Fluvial reservoir characterization of Taubaté Basin, SP.

Palavras-chaves em inglês:

Basins (Geology) – Taubaté (SP)

Geophysics

Geology - Statistical methods

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestre em Geociências.

Banca examinadora:

Alexandre Campana Vidal (Orientador)

Giorgio Basilici

José Ricardo Sturaro

Data da defesa: 27-07-2011

Programa de Pós-graduação em Geociências



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

AUTORA: Ancilla Maria Almeida de Carvalho

“Caracterização de Reservatórios Fluviais da Bacia de Taubaté.”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Campanhe Vidal

Aprovada em: 27 / 07 / 2011

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Alexandre Campanhe Vidal  - Presidente

Prof. Dr. Giorgio Basilici 

Prof. Dr. José Ricardo Sturaro 

Campinas, 27 de julho de 2011

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelas oportunidades que tive em minha vida e a minha família, pelo apoio e incentivo ao longo de meus estudos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Campana Vidal, pela dedicação, paciência e profissionalismo durante a realização desse trabalho.

A todos os professores do Departamento de Geologia e Recursos Naturais que contribuíram para a minha formação acadêmica, em especial ao Prof. Celso Dal Ré Carneiro pelo apoio, incentivo e amizade ao longo dos anos de graduação.

Aos funcionários do IG-UNICAMP, em especial aos funcionários da Pós-graduação.

À todos os colegas da turma 2004 pelos anos de convívio, amizade e agradáveis momentos em viagens de campo. E em especial para as minhas queridas amigas Tainá, Júlia, Lenita, Débora, Bárbara, Kena, e Fernanda, importantes na minha vida.

Aos amigos da CARMOD, Juliana, Michelle, Paola, Bruno e Alexandre, companheiros nessa última etapa da minha formação acadêmica. Obrigada pela ajuda e bons momentos no trabalho.

Ao meu marido, Murilo, pelo amor e carinho, por tudo.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS.....	vii
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
INTRODUÇÃO.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	3
ANEXO 1. “Carvalho, A.M.A., Vidal, A.C., Chang, H.K. Delimitação do embasamento da Bacia de Taubaté. Revista do Instituto de Geociências - USP, v. 11, n.1, p. 19-32, 2011.....	4
Resumo.....	6
Abstract.....	6
1 Introdução.....	7
2 Geologia.....	11
3 Método de trabalho.....	15
4 Resultados e Discussões.....	20
5 Conclusões.....	26
Agradecimentos.....	27
Referências Bibliográficas.....	28
ANEXO 2. “Carvalho, A.M.A., Kuroda, M.C., Vidal, A.C. Classificação e correlação de fácies sedimentares da Bacia de Taubaté, SP. (para submissão).....	31
Resumo.....	33
Abstract.....	33
1 Introdução.....	34
2 Geologia.....	37
3 Mapas Auto-organizáveis de Kohonen.....	42
4 Método de trabalho.....	44
5 Resultados e Discussões.....	47
6 Conclusões.....	60
Referências Bibliográficas.....	63

ANEXO 3. “Carvalho, A.M.A., Bueno, J.F., Kuroda, M.C., Vidal, A.C. Modelagem geológica de reservatórios fluviais da Bacia de Taubaté, SP. (para submissão).....	67
Resumo.....	69
Abstract.....	69
1 Introdução.....	70
2 Geologia.....	73
3 Etapas de trabalho.....	77
3.1 Construção do modelo estrutural.....	78
3.2 Construção do modelo geológico.....	81
3.3 Cálculo da conectividade dos reservatórios.....	86
3.4 Preenchimento do modelo de fácies com a propriedade porosidade.....	86
3.5 Cálculo do volume poroso.....	90
4 Discussão.....	90
5 Conclusão.....	91
Referências Bibliográficas.....	93

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

ANEXO 1. “Carvalho, A.M.A., Vidal, A.C., Chang, H.K. Delimitação do embasamento da Bacia de Taubaté.” Revista do Instituto de Geociências – USP, v. 11, n.1, p. 19-32, 2011

Figura 1: Mapa de localização da área em estudo. Em destaque a localização da Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo.....7

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).....8

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).....9

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).....12

Figura 5: Localização das seções sísmicas e de poços tubulares profundos na Bacia de Taubaté.....15

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.....16

Figura 7: Mapa do contorno do embasamento da Bacia de Taubaté.....22

Figura 8: Visualização 3D do contorno do embasamento da Bacia de Taubaté.....22

Figura 9: Mapa de espessura dos sedimentos da Bacia de Taubaté.....24

ANEXO 2. “Carvalho, A.M.A., Kuroda, M.C., Vidal, A.C. Classificação e correlação de fácies sedimentares da Bacia de Taubaté, SP” (para submissão).

Figura 1: Mapa de localização da área em estudo. Em destaque a localização da Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo.....36

Figura 2: 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).....	38
Figura 3: Mapa de localização dos poços na Bacia de Taubaté.....	45
Figura 4: Mapa de localização dos poços correlacionados e seções sísmicas interpretadas	47
Figura 5: Exemplo de classificação em fácies reservatório (R – cor amarela) e não-reservatório (NR – cor verde) para o poço 3ca24.....	48
Figura 6: Box-plots das variáveis RG, ILD e DT, das classes estabelecidas, para os poços 4ca25, 43cpq1,167 e 109sj160.....	50
Tabela 1: Litofácies identificadas por Riccomini (1989) na Bacia de Taubaté.....	52
Tabela 2: Litofácies identificadas por Almeida (2007) nas proximidades de Jacareí (nomeadas por letras de A a I) e na região de Taubaté (nomeadas por algarismos romanos de I a IX).....	52
Figura 7: Correlação das fácies reservatório nos poços próximos à cidade de Caçapava.....	54
Figura 8: Perfil geofísico do poço 167 exemplificando a resposta padrão da variável RG e ILD da unidade C nos poços analisados.....	55
Figura 9: Correlação das fácies reservatório e distribuição das unidades sedimentares interpretadas na seção sísmica A e nos perfis elétricos.....	56
Figura 10: Correlação das fácies reservatório e distribuição das unidades sedimentares interpretadas na seção sísmica B e nos perfis elétricos.....	57
Figura 11: Representação da direção do transporte de sedimentos no Compartimento São José dos Campos com base na análise dos poços e seções sísmicas.....	59
Figura 12: Representação das principais falhas do Compartimento Taubaté e das seções sísmicas e poços correlacionados.....	60

ANEXO 3. “Carvalho, A.M.A., Bueno, J.F., Kuroda, M.C., Vidal, A.C. Modelagem geológica de reservatórios fluviais da Bacia de Taubaté, SP. (para submissão)

Figura 1: Mapa de localização da área em estudo. Em detalhe a localização da Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo, compartimentação estrutural e localização de poços e linhas sísmicas utilizadas no estudo.....	72
Figura 2: 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).....	74
Figura 3: Mapa do embasamento da Bacia de Taubaté.....	79
Figura 4: Mapa da superfície do topo da Bacia de Taubaté.....	79
Figura 5: Área de estudo inserida no Compartimento São José dos Campos.....	80
Figura 6: Perspectiva da malha geológica e das falhas utilizadas no modelo estrutural.....	81
Figura 7: Exemplo de classificação em fácies reservatório (R – cor amarela) e não-reservatório (NR – cor verde) para o poço 3ca24.....	83
Figura 8: (A) Dados de poços distribuídos em colunas definidas pela proporção de cada fácies, (B) Histograma dos dados de fácies originais, (C) histograma dos dados de fácies regularizados.....	84
Figura 9: Curva de proporção vertical com a distribuição das fácies no bloco estudado..	84
Figura 10: Distribuição das fácies no bloco modelado (A) e histograma do modelo de fácies gerado pela SSI (B).....	85
Figura 11: Modelo de distribuição da porosidade no bloco estudado.....	89
Figura 12: Estatística dos volumes porosos obtidos após modelagem dos dados.....	90



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

Caracterização de reservatórios fluviais da Bacia de Taubaté, SP.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Ancilla Maria Almeida de Carvalho

A Bacia de Taubaté, localizada na porção leste do estado de São Paulo, ocupa uma área aproximada de 2400 km², estendendo-se ao longo do Vale do Rio Paraíba, desde Jacareí até a cidade de Cruzeiro. Posicionada no segmento central do Rifte Continental do Sudeste do Brasil, seu arcabouço estrutural é formado por semi-grábens, separados por zonas de transferência ou acomodação, com depocentros invertidos sendo caracterizada pela heterogeneidade, herança geológica da tectônica rifte que compartimentou a bacia e condicionou a sedimentação de depósitos de leques aluviais associados a planícies fluviais e sedimentos lacustres. Os sedimentos da bacia formam uma das principais fontes de exploração de água do Estado de São Paulo, fornecendo alta densidade de informação para estudo em subsuperfície, como dados de poços tubulares profundos, perfis geofísicos e seções sísmicas. A revisão de dados disponíveis na bibliografia e nos órgãos destinados ao abastecimento público permitiu a construção de uma base de dados sólida para a caracterização do embasamento da bacia e dos reservatórios fluviais que a compõem. O foco deste trabalho foi a construção de um modelo geológico tridimensional do arcabouço estrutural da bacia, da distribuição de fácies sedimentares e propriedades petrofísicas, utilizando para isso métodos geoestatísticos. A delimitação do embasamento foi realizada por meio da interpolação de dados sísmicos, gravimétricos e de poços tubulares profundos realçando a presença de quatro depocentros principais na bacia. A definição das fácies sedimentares foi realizada por meio de métodos matemáticos, a partir de perfis geofísicos, e seu resultado permitiu a correlação de poços em determinada porção da bacia gerando nessa área uma melhor caracterização da distribuição dos reservatórios. Por meio de simulação estocástica foram gerados diversos cenários da distribuição das fácies sedimentares e da porosidade de um bloco situado no Compartimento São José dos Campos, sudoeste da bacia, permitindo também a obtenção de um modelo de conectividade dos aquíferos e volume poroso do bloco estudado.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

Fluvial reservoir characterization of Taubaté Basin, SP.

ABSTRACT

Master Degree Thesis

Ancilla Maria Almeida de Carvalho

The Taubaté Basin, located in the southeastern portion of the São Paulo state, encompasses an area of approximately 2400 km², stretching along the Paraíba River Valley, from Jacaréí to the Cruzeiro city. Positioned in the central segment of the Continental Rift of Southeastern Brazil, its framework is formed by half-grabens, separated by transfer zones or accommodation with reversed depocenters been characterized by heterogeneity, geological heritage of the tectonic rift that partitioned the basin and conditioned the sedimentation of alluvial fan deposits associated with the plain aluvial and lacustrine sediments. The sediments of the basin form a major source of water exploration in the São Paulo State, providing high density of information to study the subsurface, as data from deep wells, geophysical and seismic profiles. A review of available data in the literature and organs intended for public supply has allowed the construction of a solid database for the basement characterization of the basin and the reservoirs that comprise it. The focus of this work was the construction of a three-dimensional geological model of the structural framework of the basin, the distribution of sedimentary facies and petrophysical properties using geostatistical methods. The delimitation of the basement was done through the interpolation of seismic data, gravity and information from deep wells highlighting the presence of four main depocentros basin. The definition of sedimentary facies was performed by mathematical methods, based on geophysical profiles, and the result allowed the correlation of wells in a certain portion of the basin, creating a better characterization of the reservoirs distribution in this area. Through stochastic simulation various scenarios were generated of sedimentary facies distribution and porosity of a block located in Sao Jose dos Campos Compartment, southwest of the basin, allowing the obtaining of a connectivity model of aquifers and porous volume of the block studied.

INTRODUÇÃO

O Sistema Aquífero Taubaté, representado pelos sedimentos terciários da Bacia de Taubaté, corresponde a uma das principais fontes de exploração de água do Estado de São Paulo. A bacia está situada no principal eixo de ligação entre os centros urbanos de São Paulo e Rio de Janeiro, e apresenta grande número de poços tubulares perfurados para captação de água subterrânea. Contudo, a exploração do aquífero não ocorre de modo uniforme, em virtude da grande variação da capacidade de fluxo, influenciada diretamente pela heterogeneidade litológica presente na bacia.

A modelagem de rochas-reservatório é de fundamental importância para o melhor entendimento das heterogeneidades que controlam o escoamento de fluidos. Segundo Baldissera (1992), a análise geológica (modelos deposicionais, diagenéticos e estruturais), a engenharia de reservatório (modelos de fluxo), os métodos estatísticos (clássicos e geoestatística), os métodos de interpretação dos dados sísmicos (modelos elásticos) e a informática (cálculo numérico e computação gráfica) constituem metodologias e ferramentas importantes que, combinadas entre si, permitem a melhor compreensão dos reservatórios e suas heterogeneidades.

A fase mais importante da caracterização de reservatórios é a definição do modelo geológico, o qual é estabelecido pelo modelo estrutural, estratigráfico e litológico, assim como pela análise de heterogeneidades geológicas em diferentes escalas.

Dentre as principais ferramentas utilizadas na caracterização têm-se a interpretação de seções sísmicas e análise de perfis elétricos. A interpretação das linhas sísmicas tem como fundamento a análise da geometria das maiores estruturas, através da identificação dos refletores, e definição do padrão de empilhamento dos pacotes sedimentares, delimitando corpos potenciais de rochas-reservatório. Os dados de poços permitem a correlação lateral das fácies, a determinação da geometria

dos depósitos e o conhecimento das propriedades petrofísicas (porosidade e permeabilidade) das fácies reservatórios.

A sísmica e a correlação de poços delimitam o espaço ocupado pelo reservatório, integrando feições regionais com feições locais. Contudo, devido à distância entre poços, por mais detalhada que seja a perfilagem, a mesma não fornece informações sobre a extensão lateral das variáveis analisadas, se transformando em um problema na modelagem de um reservatório. Dessa forma, as técnicas geoestatísticas de simulação estocástica são utilizadas para representar as heterogeneidades dos reservatórios e a variabilidade espacial das variáveis, inferindo estas propriedades nas áreas onde há ausência de dados (Normando, 2005).

Sendo assim, a geoestatística auxilia na interpolação dos dados adquiridos, sempre com o objetivo de fornecer o entendimento tridimensional da litologia interpretada e a distribuição das propriedades petrofísicas. O método de simulação estocástica é utilizado como uma ferramenta de modelagem capaz de incorporar a variabilidade do fenômeno modelado, mostrando possíveis cenários com a mesma probabilidade de ocorrência.

Esta pesquisa é direcionada para a caracterização de reservatórios fluviais da Bacia de Taubaté, contando com a utilização de programas de modelagem geológica. Por meio de análise de dados sísmicos e de perfis geofísicos construiu-se uma base de dados para a geração de um modelo geológico tridimensional do arcabouço estrutural, das fácies sedimentares que compõem os reservatórios fluviais da Bacia de Taubaté e das propriedades petrofísicas.

Para a definição do arcabouço estrutural da bacia buscou-se a delimitação do embasamento da bacia e das principais falhas. Foram utilizados dados de poços tubulares profundos, dados sísmicos e gravimétricos e a interpolação das informações foi realizada por ferramentas geoestatísticas. Os resultados são descritos no Anexo 1.

Para o modelo faciológico buscou-se a caracterização de fácies sedimentares por meio de ferramentas matemáticas, importantes aliadas na caracterização de litofácies e propriedades petrofísicas quando não há boa representatividade ou ausência de dados geológicos diretos, como amostras de testemunhos.

Assim, a análise dos perfis elétricos envolveu a classificação de fácies sedimentares por meio da técnica de rede neurais Mapas Auto-organizáveis de Kohonen. Uma vez obtida a classificação, a correlação entre poços e seções sísmicas permitiram um maior entendimento da distribuição da fácies reservatório no Compartimento São José dos Campos e do sistema deposicional nessa porção da bacia. Esse estudo é apresentado no Anexo 2.

Para a integração da base de dados e geração dos modelos foram utilizadas técnicas geoestatísticas de simulação seqüencial da indicatriz e simulação sequencial gaussiana. A construção do modelo geoestatístico permite avaliar o modelo geológico conceitual previamente estabelecido e a modelagem petrofísica o cálculo do volume poroso da porção estudada, contribuindo para a maior compreensão do sistema aquífero da Bacia de Taubaté. A etapa de modelagem dos dados é apresentada no Anexo 3.

O presente trabalho apresenta capítulos em forma de artigo, por isso podem ocorrer repetições de itens relacionados.

REFERÊNCIAS

Baldissera, P.R. 1992. Modelagem Estocástica de Fácies para Caracterização da Distribuição Espacial das Heterogeneidades de Reservatório. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 200p.

Normando, M.N. 2005. Impacto da Modelagem Estocástica no Processo de Caracterização de Reservatórios Maduros. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia do Petróleo. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 84p.

ANEXO 1

“Carvalho, A.M.A., Vidal, A.C., Chang, H.K. 2011. Delimitação do embasamento da Bacia de Taubaté. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, v. 11, n.1, p. 19-32.”

Delimitação do embasamento da Bacia de Taubaté

Basement delimitation of The Taubaté Basin

Ancilla Maria Almeida de CARVALHO¹, Alexandre Campana VIDAL¹, Chang Hung KIANG²

(1) Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). R. Pandiá Calógeras, 51 CEP: 13083-970. Campinas, SP. Caixa Postal: 6152.

Endereços eletrônicos: ancilla.carvalho@ige.unicamp.br; vidal@ige.unicamp.br

(2) Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista (UNESP). Av. 24-A, nº1515 CEP- 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: Chang@rc.unesp.br

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 – *Basement delimitation of The Taubaté Basin.* The aim of this work is to define the basement map of The Taubaté Basin through geostatistics using seismic, gravimetry and deep wells data. The work consisted on the interpretation of eleven seismic sections located in the central and northeast portions of the basin, getting information of basement altitude and main faults. The data increment of 79 wells added new information mainly in the region of São José dos Campos and Jacareí. The method of kriging with an external drift was applied by using seismic and well data as the main variables, while the map obtained from gravimetric data was a secondary one. The basement map obtained has a strong correlation with the main faults and a better definition was possible, in the region of São José dos Campos and in the northeast area, where the vast majority of wells are located.

Keywords: Taubaté basin, seismic, geostatistics

1. 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).

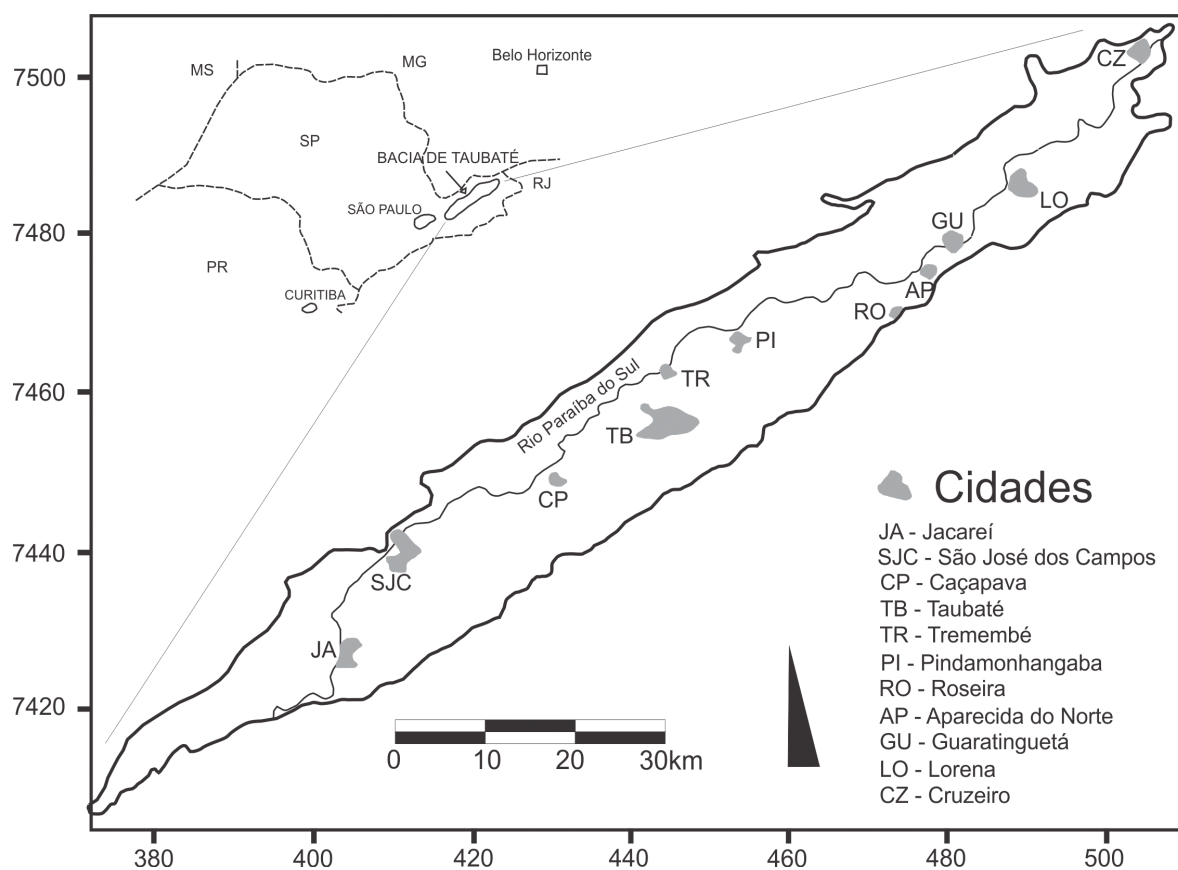


Figura 1 – Mapa de localização da área em estudo. Em destaque a localização da Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo.

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.

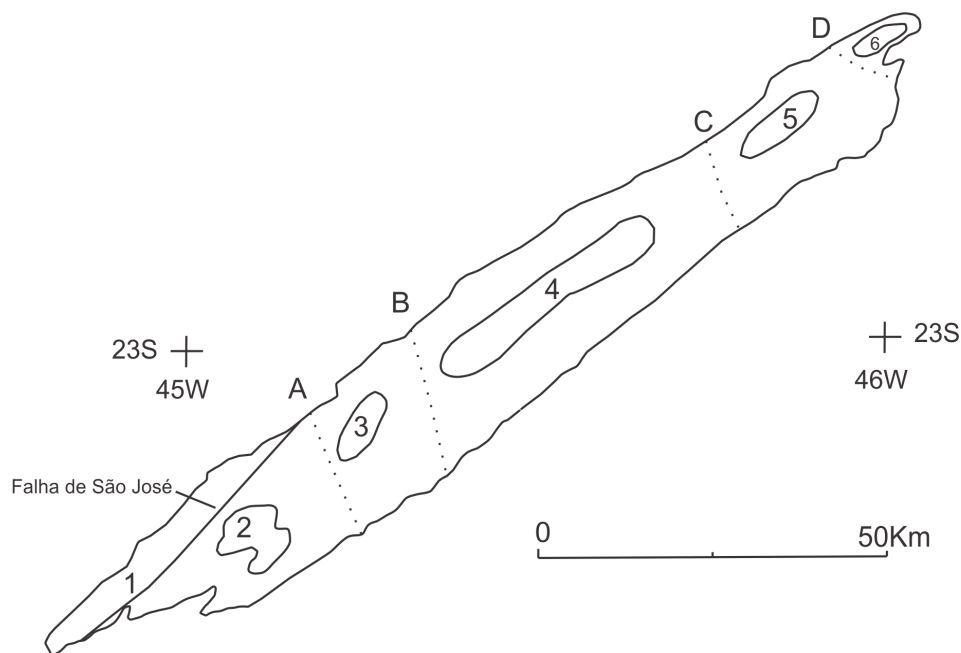
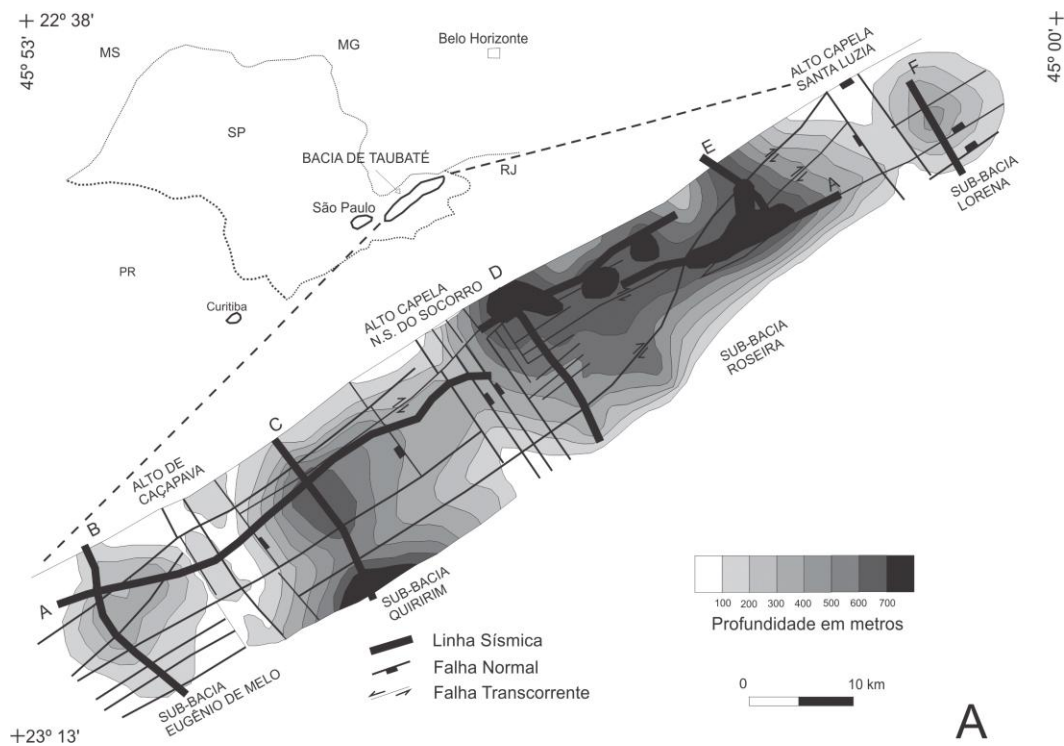


Figura 2 – Compartimentação estrutural da Bacia de Taubaté. Na figura estão representadas as sub-bacias pelos números: 1-Parateí, 2-Jacareí, 3-Eugênio de Melo, 4-Tremembé, 5-Lorena, 6-Cruzeiro. As letras representam os altos estruturais: A-Rio Putins, B-Caçapava, C-Aparecida, D-Cachoeira Paulista (Modificado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

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).



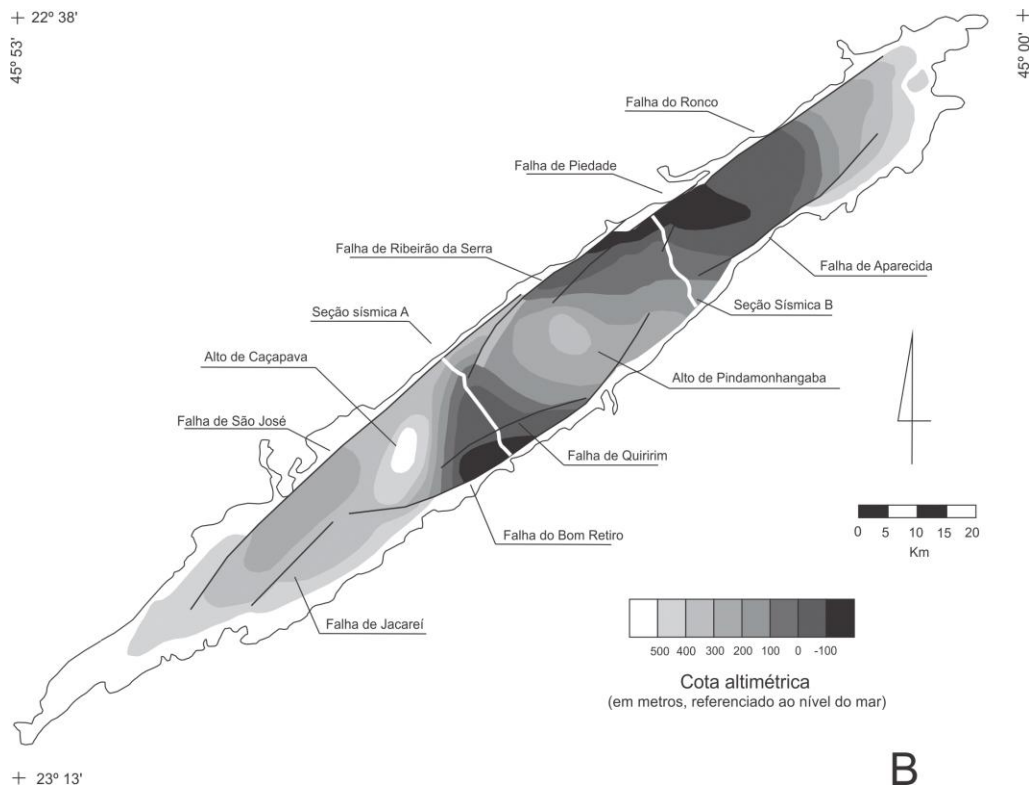


Figura 3 – (A) Mapa estrutural sísmico em profundidade do embasamento da Bacia de Taubaté (Modificado de Marques, 1990). (B) Mapa estrutural da Bacia de Taubaté, baseado em dados gravimétricos (Modificado de Fernandes e Chang, 2003).

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 1200 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 informações 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.

2. 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 cenozóica, 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 e 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 Paleoproterozóico até o Neoproterozóico (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, sintectônica 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).

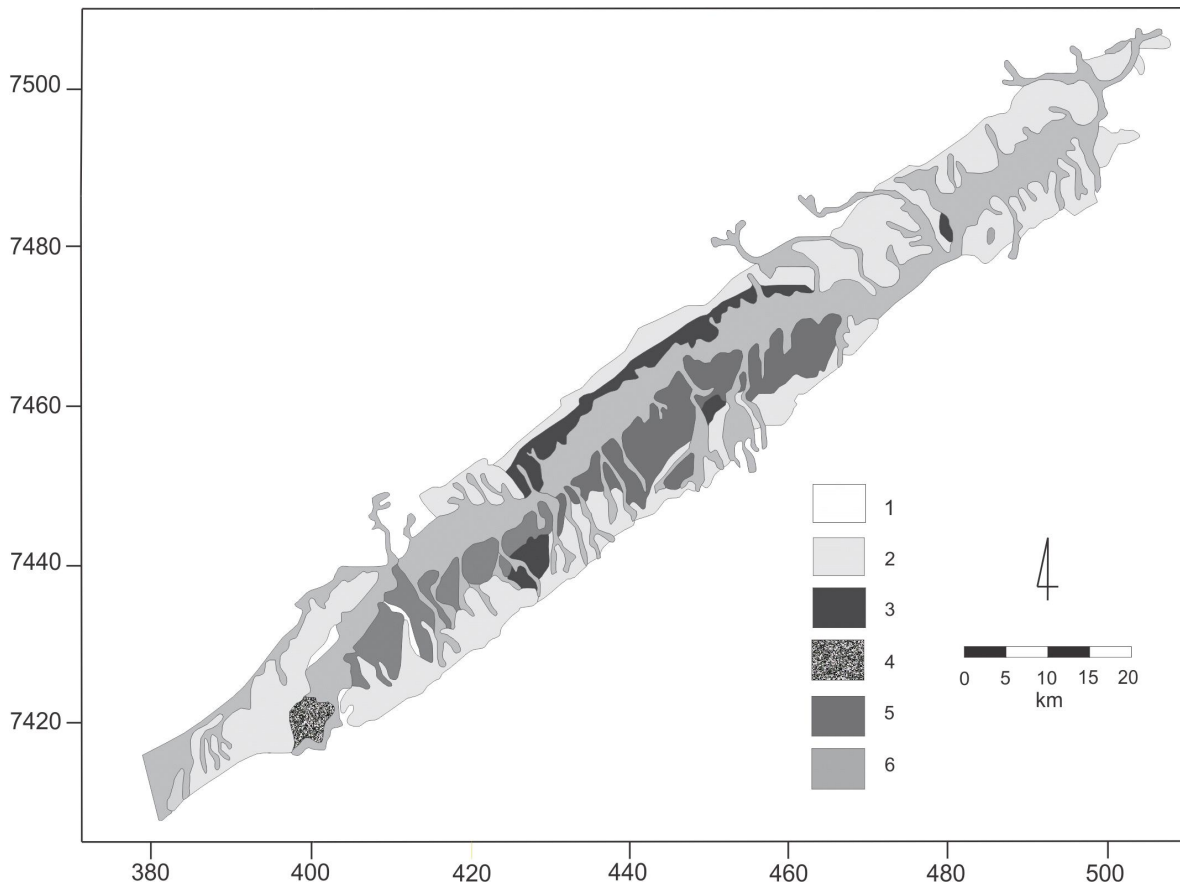


Figura 4 – Mapa geológico esquemático da Bacia de Taubaté. (1) rochas do embasamento; (2) Formação Resende; (3) Formação Tremembé; (4) Formação São Paulo; (5) Formação Pindamonhangaba; (6) sedimentos quaternários (Modificado de Riccomini, 1989).

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 e 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, ritmitos de folhelhos e margas, dolomitos e arenitos (Riccomini et al., 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 e Ferrari, 2004).

A Formação Pindamonhangaba corresponde a um sistema fluvial meandrante desenvolvido nas porções central e sudoeste da Bacia de Taubaté, recobrimo 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 Membro Presidente Dutra relacionado a 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 proterozóicas 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 e Ferrari, 2004).

Zalán e Oliveira (2005) realizam uma análise estrutural do RCSB e denominam-o como Sistema de Riftes Cenozóicos 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 bacinal 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 Neoceno/Oligoceno/Eomioceno, idade da maioria dos depósitos do SRCBS.

3. 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).

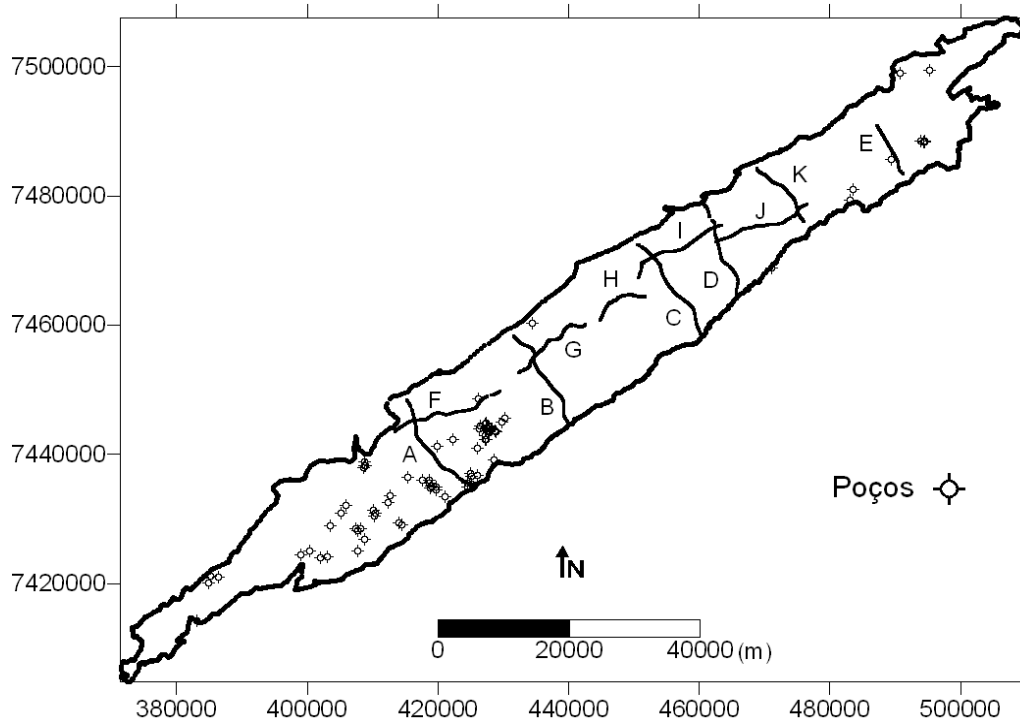


Figura 5 – Localização das seções sísmicas e de poços tubulares profundos na Bacia de Taubaté.

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

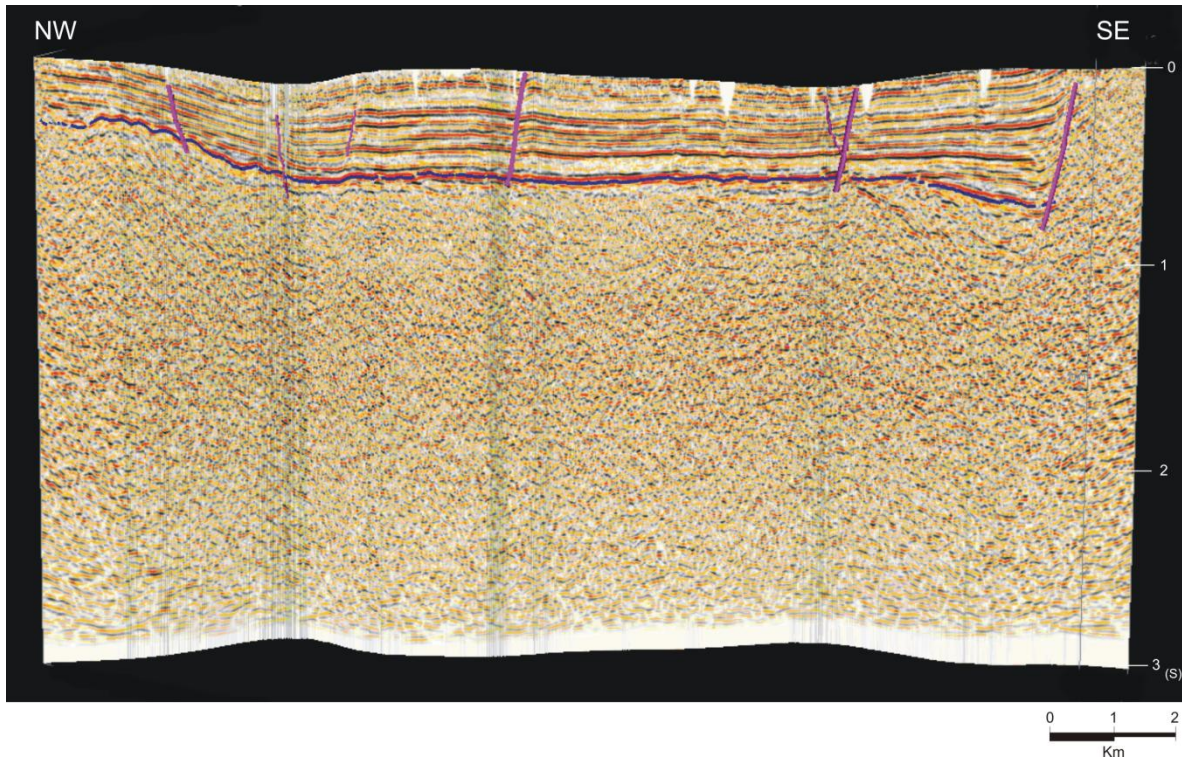


Figura 6 – Seção sísmica B, transversal à bacia. O traço horizontal em destaque indica o topo do embasamento e os traços verticais, as principais falhas.

O refletor referente ao embasamento e às principais falhas foram digitalizados 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 2000 m/s, que é, aproximadamente, a velocidade utilizada para a seção sedimentar durante o processamento sísmico, fornecendo uma relação de 1 s para 1000 m, ou 100 ms igual 100 m.

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, enquanto 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 multicolocalizadas (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 et al., 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n w_j C(x_i - x_j) - u_1 - u_2 S(x_i) = C(x_i - x_0) \text{ para } i = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n w_j = 1 \\ \sum_{j=1}^n w_j S(x_j) = S(x_0) \end{array} \right.$$

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 exhaustivamente 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.

4. 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 (Figura 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.

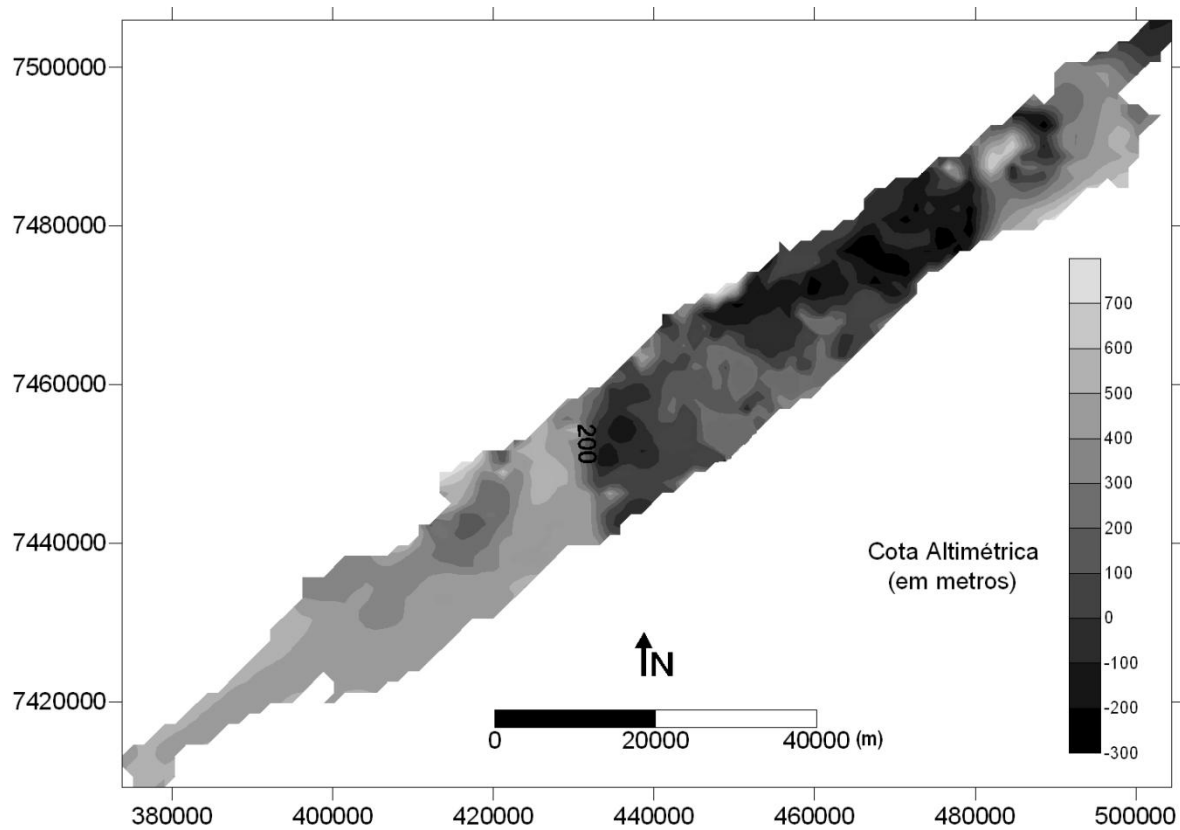


Figura 7 – Mapa do contorno do embasamento da Bacia de Taubaté.

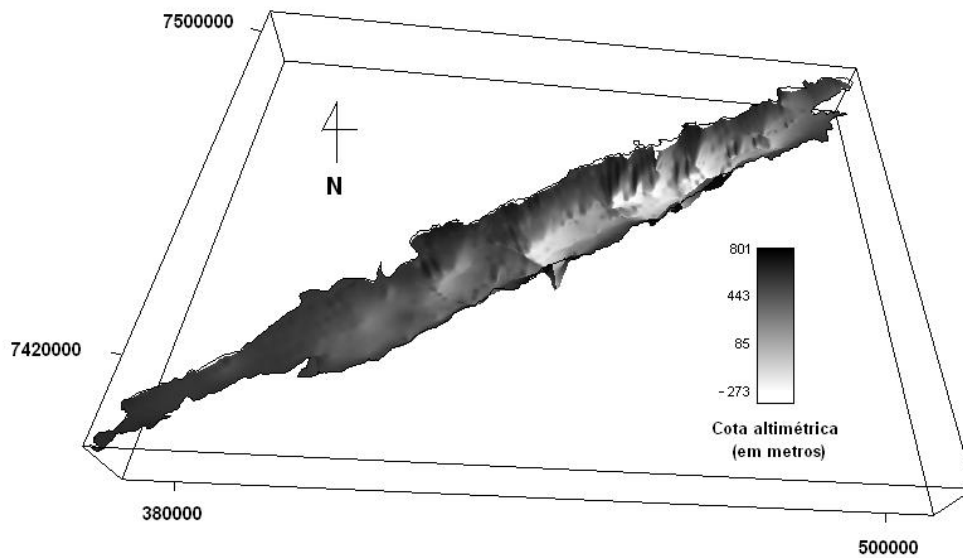


Figura 8 – Visualização 3D do contorno do embasamento da Bacia de Taubaté.

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.

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.

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).

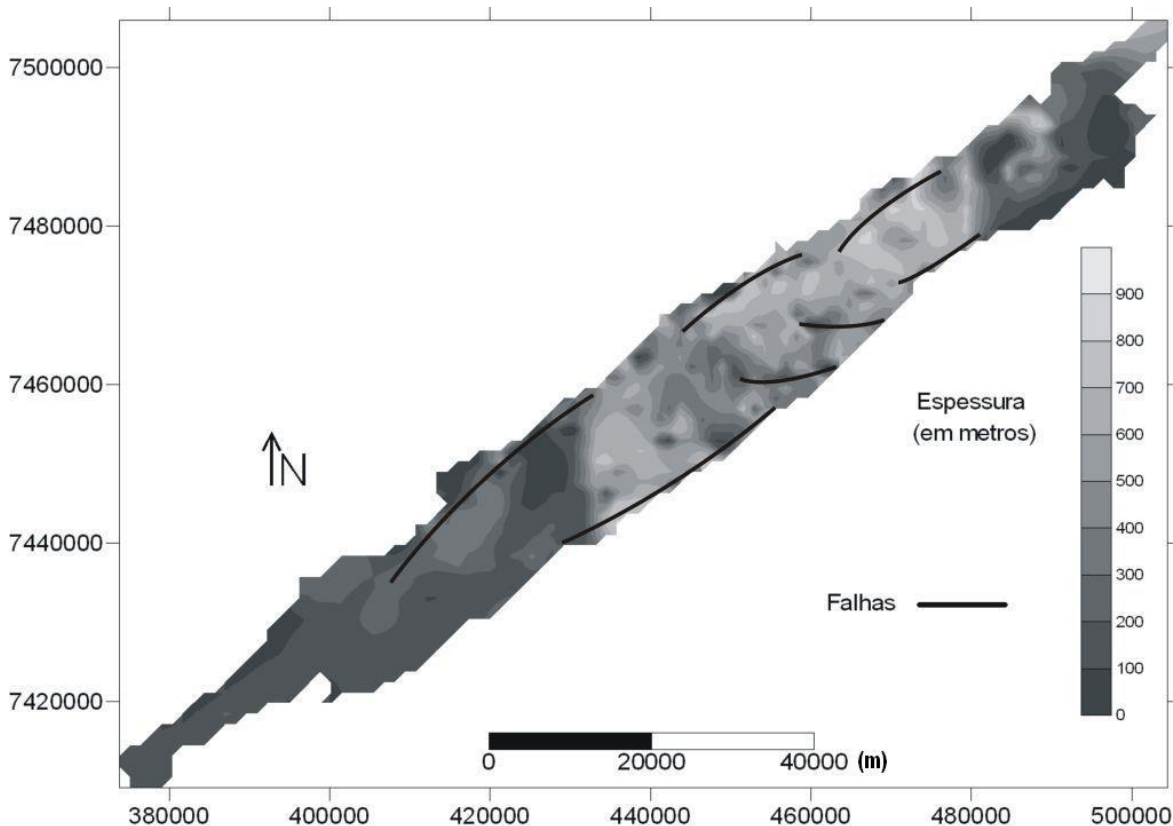


Figura 9 – Mapa de espessura dos sedimentos da Bacia de Taubaté.

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.

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).

5. 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 geoestatísticos. 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 & 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 BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M. de. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Acad. Bras. Ciênc.*, Na., 48 (Suppl.): 15-26.
- Asmus, H.E., Ferrari, A.L. 1978 Hipótese sobre a causa do tectonismo Cenozóico na região Sudeste do Brasil. In: Aspectos estruturais da margem continental Leste e Sudeste do Brasil - *Sér. Proj. REMAC*, 4:75-88.
- Bourennane, H., King, D. 2003. Using multiple external drifts to estimate a soil variable. *Geoderma* 114, 01-18.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1977. *Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 3 (São José dos Campos e Faixa Litorânea), SP*. São Paulo, DAEE, 175p.
- Deutsch, C. & Journel, A. 1992. *Geoestatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York.
- Fernandes, F.L. 1993. Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Fernandes, J.A.B. Krigagem com deriva externa aplicada à avaliação de recursos minerais de calcário e de minério laterítico. 2009. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Fernandes, F.L. & Chang, H.K. 2001. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté - Vale do Rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19:131-144.
- Fernandes, F.L. & Chang, H.K. Arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté – SP. 2003. In: IX SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 2003, Búzios. Boletim de resumos...Rio de Janeiro, p. 367-370.

- Galli, V., Blitzkow, D., SÁ, N.C. 1988. Carta gravimétrica do Estado de São Paulo. São Paulo. IPT (Rel. nº 25.645).
- Hasui, Y. & Ponçano, W.L. 1978. Organização estrutural e evolução na Bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, v. 1, *Anais...* Recife, Pernambuco, 1978, p. 368-381
- Mancini, F. Estratigrafia e aspectos da tectônica deformadora da Formação Pindamonhangaba, Bacia de Taubaté, SP. São Paulo, 1995, Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 107p.
- Marques, A. 1990. 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.
- Padilha, A.L., Trivedi, N.B., Vitorello, Í., Costa, J.M. 1991. Geophysical constraints on tectonic models of Taubaté Basin, southeastern Brazil. *Tectonophysics*, 196:157-172.
- Riccomini, C. O rift continental do sudeste do Brasil. São Paulo, 1989. Dissertação de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Riccomini, C., Coimbra, A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. In: Negro, J.R.A., Ferreira, A.A.; Alonso U.R.; Luz, P.A. (eds). *Solos da Cidade de São Paulo*. São Paulo: ABMS/ABEF, p. 37-94.
- Riccomini, C., Sant'anna, L. G., Ferrari, A. L. 2004. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., et al. (eds). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 1 ed., São Paulo, Beca Produções Culturais Ltda, cap. 23.
- Rocha, M. M., Yamamoto, J. K., Fonteles, H.R.N. 2009. 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. 09, p. 73-84.
- Soares, A. 2000. *Geoestatística para ciências da terra e do ambiente*. I.S.T. Press. 206 p.

Wackernagel, H. 1998. *Multivariate geostatistics*. Springer-Verlag, Berlin, 2º edição, 291 p.

Wackernagel, H. 2003. *Multivariate geostatistics*. Springer-Verlag, Berlin, 3º edição, 387 p.

Zalán, P.V., Oliveira, J.A. 2005. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v.13, n.2 (Mai/Nov), p. 269-300.

ANEXO 2

“Carvalho, A.M.A., Kuroda, M. C., Vidal, A.C. Classificação e correlação de eletrofácies na Bacia de Taubaté, SP (para submissão).”

Classificação e correlação de eletrofácies na Bacia de Taubaté, SP.

Ancilla Maria Almeida de CARVALHO¹, Michelle Chaves KURODA¹, Alexandre Campana VIDAL¹

(1) Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). R. Pandiá Calógeras, 51 CEP: 13083-970. Campinas, SP. Caixa Postal: 6152.
Endereços eletrônicos: ancilla.carvalho@ige.unicamp.br; mckuroda@ige.unicamp.br; vidal@ige.unicamp.br

RESUMO – A classificação de fácies é uma etapa fundamental no processo de caracterização geológica de uma bacia sedimentar. Diante da ausência de dados de testemunhos, a integração de ferramentas matemáticas e dados geológicos indiretos, como perfis geofísicos e seções sísmicas, torna-se essencial para a estimativa das fácies e suas propriedades petrofísicas. Assim este trabalho tem como foco a classificação de eletrofácies da Bacia de Taubaté, utilizando dados de perfis geofísicos, por meio da técnica de redes neurais Mapa Auto-organizáveis de Kohonen. A classificação obtida permitiu a identificação das unidades reservatório, a correlação dessas unidades nas regiões dos municípios de São José dos Campos e Caçapava e associação com unidades sísmicas identificadas na região, propiciaram um melhor entendimento da distribuição das unidades sedimentares nessa porção da bacia.

Palavras-chave: Bacia de Taubaté, Redes Neurais, perfis geofísicos.

ABSTRACT – The facies classification is a fundamental step in the process of geological characterization of a sedimentary basin. Given the lack of core data, the integration of mathematical techniques and indirect geological data, such as geophysical logs and seismic sections, it becomes essential to estimate facies and petrophysical properties. The aim of this work is applying the neural network technique, Kohonen Self-organizing Maps, to define eletrofacies from the geophysical logs, in Taubate Basin. This classification allowed the identification of reservoir units, the correlation of this units in São José dos Campos and Caçapava areas and association with seismic units provided a better understanding of the distribution of sedimentary units in this portion of the basin.

Keywords: Taubaté Basin, Neural network, well log.

1. INTRODUÇÃO

Na caracterização de reservatórios, a definição do modelo geológico é uma etapa importante que inclui a definição do modelo faciológico, das propriedades petrofísicas e das propriedades das dinâmicas dos fluidos, permitindo a melhor compreensão dos reservatórios e suas heterogeneidades (Consentino, 2001).

A etapa de caracterização de fácies em subsuperfície implica no estudo de litofácies por meio de dados geológicos diretos, como dados de testemunhos, e dados indiretos, como sísmica e perfis geofísicos de poços. Tradicionalmente a classificação litológica ocorre de forma mais precisa por meio da análise de testemunhos, contudo este tipo de informação possui disponibilidade limitada. Desse modo, a análise de perfis geofísicos, aliada a técnicas de estatística multivariada e de inteligência artificial, é de fundamental importância na estimativa de propriedades litológicas e petrofísicas.

Os diferentes perfis de poços fornecem informações sobre algumas propriedades da rocha tornando possível, com o auxílio de métodos estatísticos multivariados, agrupar amostras com características semelhantes, denominadas frequentemente como eletrofácies.

Os métodos de estatística multivariada incluem a análise discriminante (Tang et al. 2004; Li e Anderson-Sprecher, 2006), análise de agrupamentos, análise de componentes principais (PCA, Jolliffe, 2002), análise de componentes independentes (ICA), entre outros. Segundo Tang & White (2008) esses métodos são flexíveis e fornecem expressões matemáticas claras da relação fácies-perfil.

Os métodos ICA e PCA têm por finalidade a redução de dados a partir da eliminação de redundância em cada dimensão, enquanto a análise discriminante busca encontrar a melhor função (também linear) de um conjunto de variáveis, que reproduza um agrupamento a priori de casos

considerados. Todavia, devido ao aumento de complexidade, os dados podem não apresentar a correlação esperada com tais métodos, inviabilizando a implementação. Para explorar relações mais complexas e eficazes, levando em conta as muitas variáveis dos dados, sem eliminá-los da análise, os métodos mais indicados segundo Bishop (1994), são as redes neurais artificiais.

Dentre as vantagens da utilização destes métodos, pode-se destacar sua sensibilidade à presença de ruídos no conjunto de dados, a não necessidade de conhecimento da distribuição estatística das variáveis (não possui restrições a tipos de dados) e a modelagem de relações não-lineares entre as variáveis. (Bishop 1994, Costa 1999 e Stundner et. al 2004)

As redes neurais artificiais são métodos típicos de inteligência artificial (Baldwin et al 1990; Bhatt & Helle, 2002). São classificadas em dois tipos principais, não-supervisionadas e supervisionadas (baseadas na existência de informações a priori). Segundo Chang et al. 2000, para as redes supervisionadas, a mais comum é rede neural de retro-propagação (BPNN) e para as redes não-supervisionadas os Mapas Auto-organizáveis de Kohonen (SOM, Self-Organizing Map).

Segundo Coléou et al. (2003), dentre as técnicas disponíveis de agrupamento a ferramenta SOM apresenta resultados precisos e representa um método menos custoso que os demais. Tendo como característica essencial o reconhecimento de padrões sem a utilização de informações prévias dos dados, este método torna-se um importante auxiliar na caracterização de dados de poços sem testemunho.

A principal característica do método é a visualização em duas dimensões dos agrupamentos que realiza em dados n-dimensionais de uma forma conveniente (Kohonen, 2001).

Nesse sentido, este trabalho tem por finalidade a aplicação da ferramenta SOM aos perfis geofísicos disponíveis na Bacia de Taubaté para a caracterização de eletrofácies. A aplicação dessa ferramenta torna-se apropriada, pois existe elevado número de poços com perfis de raio gama e resistividade, porém com pouca informação geológica detalhada ao longo dos poços.

A definição das principais eletrofácies como também a correlação dos principais perfis na região das cidades de São José dos Campos e Caçapava, áreas que apresentam maior densidade de informação, propiciará o melhor entendimento da distribuição de unidades sedimentares e do modelo deposicional na bacia.

A Bacia de Taubaté, situada no principal eixo de ligação entre os centros urbanos de São Paulo e Rio de Janeiro, corresponde a uma das principais fontes de exploração de água do Estado de São Paulo (Figura 1). Por apresentar alta densidade de poços em algumas porções, linhas sísmicas 2D, boa exposição em afloramentos e significativo número de trabalhos publicados, possibilita ser estudada como um exemplo análogo a reservatórios fluviais.

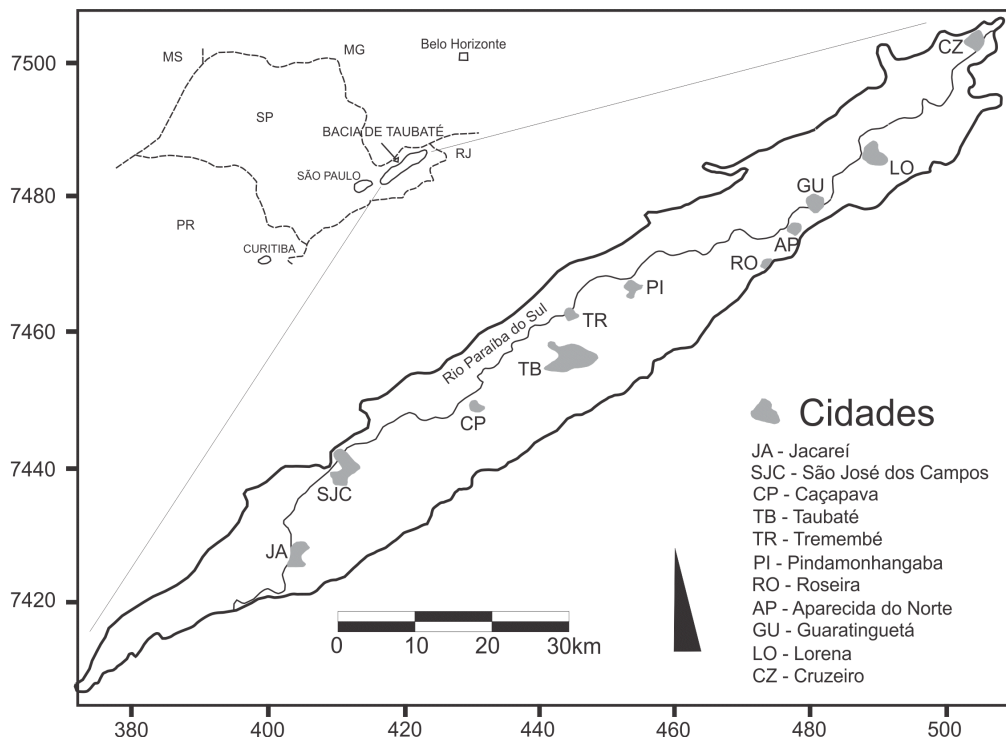


Figura 1 – Mapa de localização da área em estudo. Em destaque a localização da Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo.

2. 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 cenozóica, posicionada entre as Serras do Mar e Mantiqueira, na porção leste do estado de São Paulo.

O arcabouço da bacia é formado por semigrábens, separados por zonas de transferências ou de acomodação, com depocentros invertidos e leques aluviais associados às falhas de borda, em típica geometria de bacia do tipo rifte (Fernandes 1993). Fernandes & Chang (2001, 2003) propõem a subdivisão em três compartimentos, denominados de sudoeste para nordeste, de São José dos Campos, Taubaté e Aparecida, separados por dois altos estruturais internos, altos de Caçapava e Pindamonhangaba. Carvalho et al. (2011), por meio de métodos geoestatísticos e a partir de dados sísmicos, gravimétricos e de poços, propõem a subdivisão da bacia em quatro depocentros principais, corroborando a proposta de Marques (1990) para a sub-bacia Lorena na porção nordeste da bacia, separada do Compartimento Aparecida pelo Alto da Capela de Santa Luzia (Figura 2).

A Bacia de Taubaté apresenta sedimentação tipicamente continental e, segundo Riccomini (1989), o preenchimento pode ser dividido em duas fases: a primeira, sintectônica 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 2).

Appi et al. (1986) e Chang et al. (1989), utilizando-se da análise de sequência, dividem a evolução sedimentar da Bacia de Taubaté em três fases principais. A fase I corresponde ao desenvolvimento de um sistema de leques aluviais, com a deposição de fácies de fluxo gravitacional, caracterizadas por lamitos e lamitos arenosos (Formação Resende). Com a continuidade da subsidência se instalaria a fase II, correspondente a um sistema lacustre, que se

estenderia até o seu ápice, durante a deposição de folhelhos betuminosos da região de Tremembé (Formação Tremembé). Nesta fase ocorrem cheias esporádicas que propiciam a deposição de corpos de inunditos nas bordas dos lagos, e um evento de ressecamento responsável pela formação de uma camada de calcário tipo caliche. A fase III corresponde à implantação de um sistema fluvial meandrante que persistiu até o Holoceno (Formação São Paulo e Pindamonhangaba).

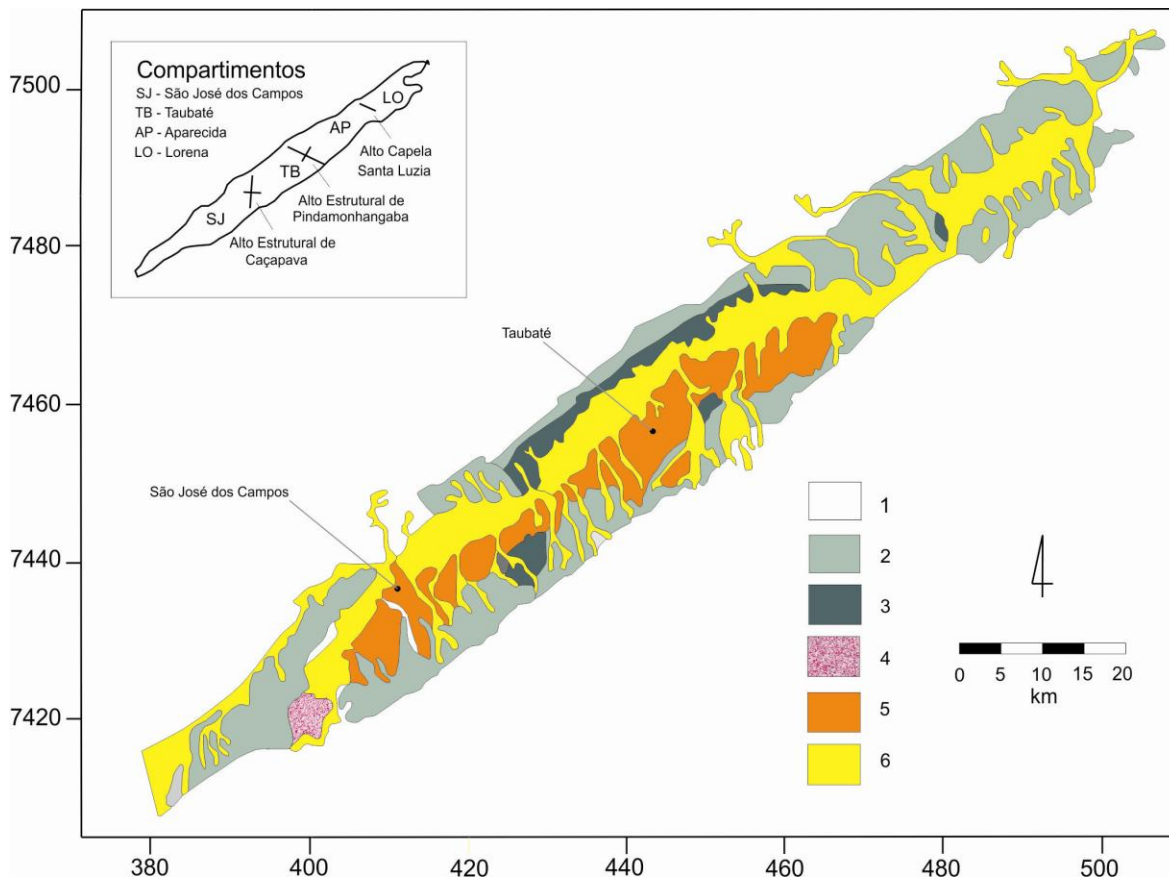


Figura 2 – Mapa geológico esquemático da Bacia de Taubaté. (1) rochas do embasamento; (2) Formação Resende; (3) Formação Tremembé; (4) Formação São Paulo; (5) Formação Pindamonhangaba; (6) sedimentos quaternários (Modificado de Riccomini, 1989).

No estudo da estratigrafia das bacias de idade paleógena dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, Riccomini (1989) identifica vinte fácies que foram agrupadas nos sistemas deposicionais correspondentes. Segundo o autor, a principal fase de desenvolvimento do RCSB ocorreu no

Eoceno-Oligoceno, com o preenchimento sedimentar sintectônico representado pelo Grupo Taubaté. Das vinte fácies identificadas onze possuem boas representações na porção sul e central da Bacia de Taubaté

A Formação Resende, unidade basal e lateral do Grupo Taubaté, apresenta depósitos de sistema de leques aluviais associados a planícies aluviais de rios entrelaçados. 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 et al. 2004).

As rochas conglomeráticas predominam ao longo da borda norte das bacias do segmento central do RCSB, onde foram depositadas por processos de fluxos gravitacionais subaéreos. Na Bacia de Taubaté ocorrem próximo as falhas de borda, aflorando na borda norte do Compartimento Aparecida e sul do Compartimento Taubaté. As porções medianas e distais dos leques aluviais são representadas por lamitos e lamitos arenosos maciços, por vezes conglomeráticos, que interdigitam-se lateralmente com os depósitos de leques aluviais proximais. As porções mais distais de leques aluviais podem conter acumulações locais de matéria orgânica (linhito) de espessura centimétrica a decimétrica (Riccomini et al. 2004).

Almeida (2007) a partir de descrições detalhadas de perfis sedimentológicos situados na borda sudeste da bacia, proximidades de Jacareí, define a existência de nove fácies sedimentares, dentre elas conglomerados, arenitos conglomeráticos, arenito médio grosso e siltito maciço. Os afloramentos estudados representariam um sistema de leques aluviais de clima árido depositados na borda flexural do compartimento sul do rifte.

Na porção central da bacia, Almeida (2007) descreve um trecho testemunhado onde reconhece também a existência de nove fácies: arenito conglomerático, arenito médio maciço, siltito maciço, argilito maciço, arenito muito fino, arenito fino, siltito com bioturbações, diamictito e folhelho, que

representariam uma sedimentação de leques aluviais na borda falhada do compartimento central do rifte.

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 & Coimbra, 1992). A partir de dados de sondagens e afloramentos, as principais litofácies reconhecidas na Formação Tremembé compreendem: argilitos verdes maciços, ritmitos de folhelhos e margas, dolomitos e arenitos (Riccomini, 1989; Riccomini et al. 1992).

A unidade topo do Grupo Taubaté é a Formação São Paulo, representada por depósitos sedimentares relacionados a sistemas fluviais meandrantos. As principais litofácies da Formação São Paulo são arenitos grossos, conglomeráticos com estratificações cruzadas, base erosiva e presença de clastos argilosos, representantes de depósitos de canais meandrantos; siltitos e argilitos laminados, às vezes fossilíferos (linhitos), depositados em meandros abandonados; e arenitos médios a grossos com sedimentos de rompimento de diques marginais, gradando para sedimentos mais finos, rítmicos e laminados de planície de inundação (Riccomini et al. 2004).

Recobrimo discordantemente os depósitos da Formação Tremembé, Resende e São Paulo ocorrem os depósitos da Formação Pindamonhangaba, que corresponde a um sistema fluvial meandrante desenvolvidos na porção central e sudoeste da Bacia de Taubaté. 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 Membro Presidente Dutra relacionado a deposição em planície de inundação de sistema fluvial meandrante de granulação fina.

A partir da interpretação de seções sísmicas, Fernandes (1993) realiza uma análise estratigráfica dos sedimentos da Bacia de Taubaté. São reconhecidas cinco unidades sísmicas em onze seções sísmicas interpretadas ao longo da bacia. Segundo o autor, as unidades constituem

conjuntos de refletores com características semelhantes entre si. Entretanto o autor afirma que a divisão foi baseada em variações verticais de refletores sísmicos, assim uma mesma unidade sísmica pode conter diferentes características sísmicas, conforme sua localização na bacia.

A unidade sísmica A é a mais antiga, recobrindo o embasamento e limitada à porção nordeste da bacia. Possui formas em cunha muito irregulares interdigitando-se com depósitos fanglomeráticos próximo às falhas de borda. Segundo o autor suas sismofácies progradacionais podem caracterizar processos trativos, característicos de deposição de conglomerados e arenitos.

A unidade B tem distribuição extensiva, presente em todos os compartimentos da bacia, recobrindo a unidade A. Na porção noroeste e central da bacia a unidade B assenta-se diretamente sobre o embasamento e mantém contato com os fanglomerados nas proximidades da Falha de Borda. Essa unidade apresenta-se sob a forma tabular irregular ou em cunhas e suas simofácies, subparalela a caótica, poderia estar associada a um sistema fluvial ou flúvio-lacustre.

A unidade C recobre a unidade sísmica B e seu conjunto de refletores apresentam excelente continuidade lateral, podendo ser rastreada em toda a bacia. Suas sismofácies variam de paralela a paralela levemente contínua e, segundo Fernandes (op. cit.), são características de processos de suspensão. Nas porções centrais da bacia essa interpretação é corroborada por dados de descrição litológica de um poço perfurado na cidade de Taubaté, no qual ocorre um espesso pacote de folhelhos e lamitos com intercalações de fácies grosseiras interpretadas como depósitos de inunditos por Riccomini (1989).

A unidade D é expressão da sedimentação mais recente da Bacia de Taubaté, possuindo forma de lençol e limite inferior representado por concordância com a unidade C. Seu maior desenvolvimento ocorre na porção central da bacia, onde as sismofácies predominam de forma paralela, em outras porções as características dessa unidade são mascaradas por efeito do

processamento sísmico. Segundo Fernandes (1993) diante das características na porção central da bacia o ambiente deposicional dessa unidade variou pouco em relação à unidade C.

Por fim a unidade E é caracterizada nas proximidades das falhas de borda da bacia avançando sobre refletores mais contínuos. A sismofácies é caótica, formada por refletores pouco ordenados representativos dos depósitos de leques aluviais proximais da Formação Resende.

3. MAPAS AUTO ORGANIZÁVEIS DE KOHONEN

A técnica SOM, desenvolvida por Kohonen (1982), tem o intuito de fornecer mapas temáticos ordenados a partir dados de entrada, após agrupamento (Freeman e Skapura, 1991; Ripley, 1996). Esta técnica baseia-se no processo de aprendizagem competitiva, onde somente uma unidade computacional de saída (também chamada de BMU) fornece uma resposta ativa a um sinal de entrada corrente (Gonçalves et al. 1996).

O objetivo do algoritmo é mapear o conjunto de dados de entrada em um espaço de dimensão inferior, delineado por uma estrutura geométrica, chamada de mapa auto-organizável (Kohonen, 2001). A ferramenta produz assim a similaridade entre os dados de entrada e gera mapas para a visualização de agrupamentos de dados multidimensionais, transformando relações estatísticas entre dados de alta dimensão em relações geométricas simples dos pontos correspondentes no espaço de dimensão inferior. Um conjunto de dados próximos em um espaço de entrada terá representações próximas no espaço de saída e assim serão classificados como pertencentes ao mesmo grupo ou em agrupamentos próximos.

O processo competitivo ocorre segundo critério de maior similaridade dado pela métrica de distância Euclidiana, medida entre o vetor de entrada e cada uma das unidades do mapa. Este valor é

ponderado a partir do vetor peso associado a cada neurônio, que define a localização do neurônio no mapa.

Encontrado o BMU mais próximo, o algoritmo atualiza os valores do peso do BMU vencedor e dos seus vizinhos, segundo função inversamente proporcional a distância entre eles, e por este motivo o mapa formado é também chamado de malha elástica. Este tipo de ajuste garante ao mapa a importante característica de conservação de topologia.

A abordagem não supervisionada do método permite a auto-adaptação do algoritmo a qualquer base de dados de entrada sem conhecimento *a priori*. Todavia, por não utilizar marcadores durante a análise, os grupos encontrados pelo algoritmo precisam ser avaliados por um intérprete, para identificação de cada um dos conjuntos.

Em geral a quantidade de unidades do mapa é extremamente alta e faz-se necessário um segundo reagrupamento desses BMUs, que frequentemente representam grupos com mesmas características que seus vizinhos. Esse reagrupamento é comumente realizado pelo método K-means. Trata-se de uma ferramenta de agrupamento tradicional e mais simples que o primeiro, pois não leva em consideração a conservação de topologia, desnecessária para este segundo reagrupamento, uma vez que esta segunda análise é realizada para os centróides de cada BMU, cuja topologia já se encontra conservada (Kohonen, 2001).

A análise dos dados com SOM e k-means apresenta sensibilidade e desempenho diretamente associadas às escolhas dos atributos de entrada, como número de iterações ou tamanho do raio de ajuste da malha, mas também está atrelada à complexidade dos dados (contínuos ou discretos), quantidade de variáveis envolvidas e tamanho da amostra. A decisão dos parâmetros de entrada, segundo Kohonen (2001), não necessita de escolha lógica e depende diretamente da experiência e sensibilidade do analista, por isso faz-se necessária a realização de baterias de testes.

4. MÉTODO DE TRABALHO

O trabalho foi desenvolvido em duas etapas, a primeira de classificação das eletrofácies dos perfis geofísicos disponíveis nas porções sudoeste e nordeste da bacia, e a segunda de correlação de unidades sedimentares e associação com seções sísmicas na região de São José dos Campos e Caçapava.

Para a realização da primeira etapa foram utilizadas informações de 33 poços tubulares profundos, localizados nas regiões das cidades de Jacareí, São José dos Campos, Caçapava e Lorena (Figura 3). Os dados de perfilagem elétrica foram concedidos pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e apresentam curvas de raios gama (GR), resistividade (ILD), sônico (DT) e potencial espontâneo (SP).

No presente estudo foram utilizadas as curvas de GR, ILD e DT, por apresentarem melhor resposta a variação litológica descrita no poço. Os perfis de SP apresentaram baixa resolução para a maioria dos poços. O perfil de RG registra a radioatividade natural da rocha e está relacionado ao conteúdo de argila. O perfil DT registra o tempo que um pulso sonoro leva para atravessar um intervalo de formação (Serra, 1986; Rider, 2000), com valores diretamente relacionados à porosidade da rocha. O perfil de resistividade indica a presença de fluídos na rocha através da resistência oferecida à corrente elétrica (Thomas et al. 2004).

Os dados de poços foram digitalizados e adequados a aplicação do método de Redes Neurais para a determinação das eletrofácies. A classificação realizada, com base nos perfis, é não-supervisionada, ou seja, não é guiada por dados de testemunhos. Assim a Rede Neural Artificial adequada para essa abordagem é a ferramenta SOM, que neste trabalho tem como propósito a caracterização de eletrofácies, respondendo quais características dos perfis estão associadas a cada grupo encontrado com o método.

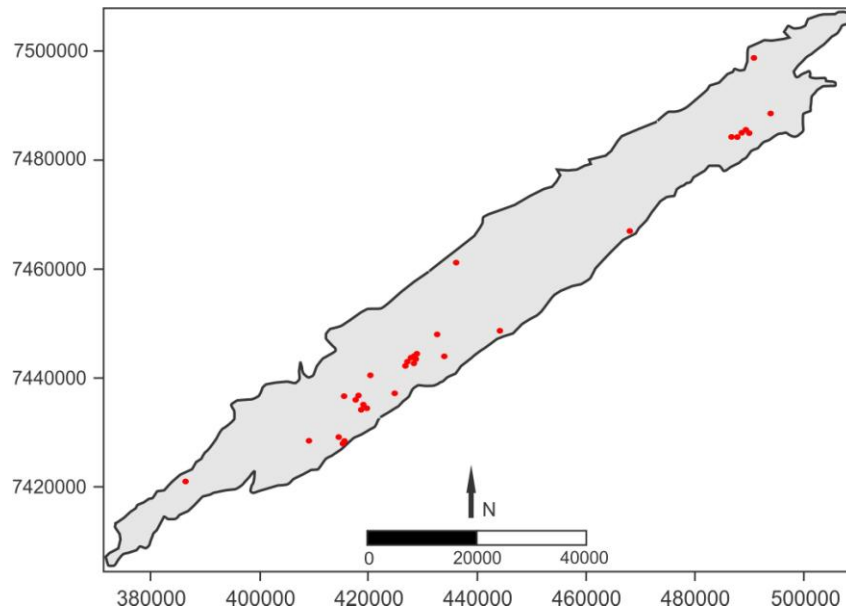


Figura 3 – Mapa de localização dos poços na Bacia de Taubaté.

As classificações propostas foram realizadas no software Matlab®, versão 7.6.0. Para os diversos treinamentos dos perfis foi utilizada a ferramenta desenvolvida por Vesanto (1999), intitulada “Self-Organizing Map in Matlab”.

Após a utilização do método SOM, os resultados obtidos foram analisados por meio de análise estatística ANOVA (Análise de Variância). Este algoritmo é utilizado para diagnóstico de variação de médias dentro ou entre grupos, através de teste de Hipótese com distribuição F. A partir dessa análise é possível inferir se há interação entre variáveis ou grupos, construídos pelo método SOM. Por isso, a análise ANOVA também foi utilizada para validar os grupos encontrados, através do estudo da variação de médias entre as variáveis envolvidas, diagnosticando possibilidade de interação entre elas.

Para ilustrar os valores das variáveis para cada grupo foram gerados gráficos do tipo box-plots, verificando-se o comportamento dos atributos dos perfis.

As classificações obtidas foram também analisadas segundo parâmetros geológicos. Primeiramente foi realizada uma análise frente aos valores das variáveis RG, ILD e DT, buscando compatibilidades entre a classificação obtida e o comportamento esperado dos perfis. Para isso os dados de perfis e as eletrofácies encontradas foram importados no *software* de modelagem geológica Petrel®.

Em seguida as eletrofácies foram analisadas em relação às descrições de amostras de calha. Dos 33 poços utilizados na classificação, 27 possuíam tais descrições permitindo, dessa forma, avaliar a correlação entre os resultados obtidos pelo método SOM e a descrição de calha.

Os resultados foram analisados em maior detalhe para os poços da região de São José dos Campos e Caçapava. Esta etapa tem como alvo principal correlacionar as fácies encontradas na classificação e associá-las as seções sísmicas presentes nessa porção da bacia.

Foram utilizados 13 poços, agrupados conforme a localização, e duas seções sísmicas 2D, adquiridas pela PETROBRAS em 1988 e concedidas pela ANP – Agência Nacional de Petróleo (Figura 4). Nos perfis geofísicos de poços, as eletrofácies foram digitalizadas e sua continuidade lateral foi interpretada segundo padrões de similaridade das curvas entre diferentes poços.

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

A divisão da coluna sedimentar em unidades sísmicas foi baseada no trabalho de Fernandes (1993). Nas seções utilizadas no presente trabalho, são reconhecidas quatro unidades sísmicas, designadas por Fernandes (1993) como unidade B, C, D e E, que foram associadas aos padrões encontrados na interpretação dos perfis geofísicos.

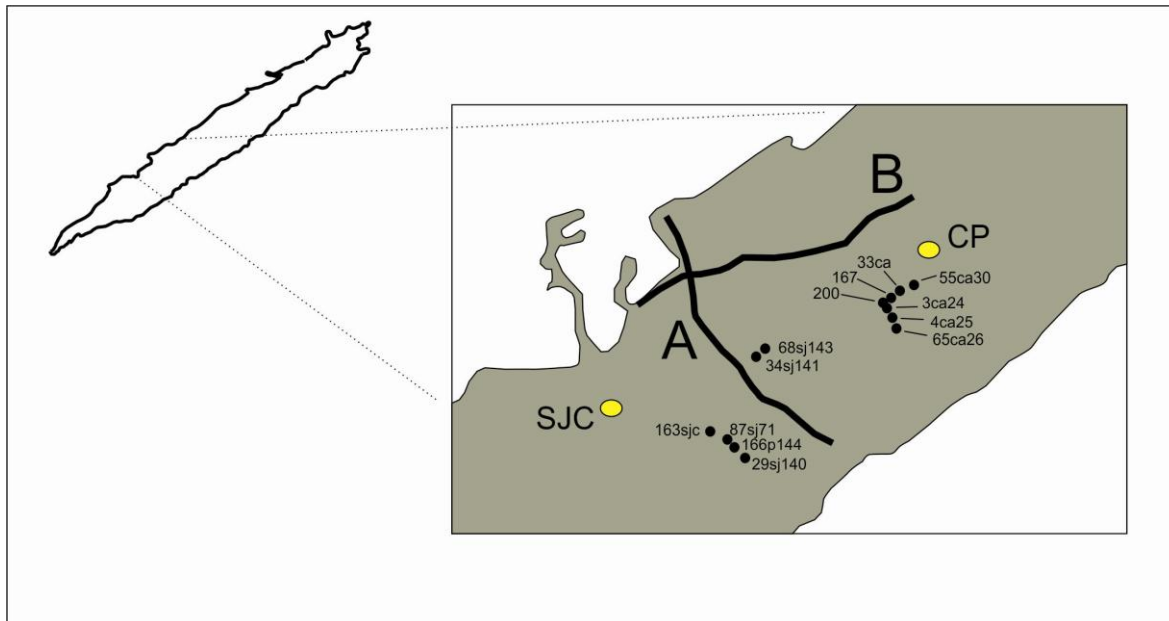


Figura 4 – Mapa de localização dos poços correlacionados e seções sísmicas interpretadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o conjunto de dados foram realizados testes com o método SOM para diferente número de grupos: 2, 3 e 4 eletrofácies. O menor quadrado médio do erro das simulações realizadas foi encontrado para 2 eletrofácies, que apresentou valores entre 11% e 5,4%, enquanto que para 3 e 4 fácies foram encontrados intervalos de erros entre: 15% a 16% e 19% a 23%, respectivamente.

Dessa forma a melhor classificação encontrada para o grupo de perfis foi em duas eletrofácies distintas, que após análise dos resultados foram classificadas como reservatório e não-reservatório (Figura 5). Observa-se que a eletroeletofácies reservatório apresenta baixos valores de raio gama e altos de resistividade, referentes a intervalos com presença de água de baixa salinidade (potável). Como a maioria das eletrofácies descritas na bibliografia é composta por sedimentos siliciclásticos, os baixos valores de RG representam os arenitos limpos, referentes a intervalos aquíferos pela associação com o perfil resistividade.

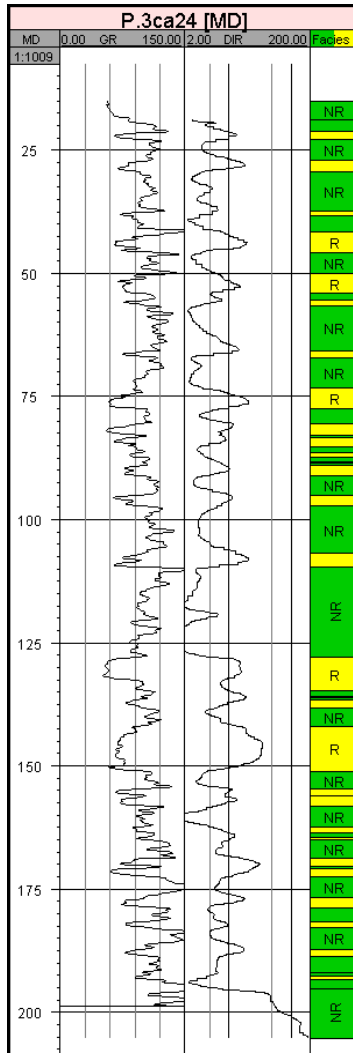


Figura 5 – Exemplo de classificação em eletrofácies reservatório (R – cor amarela) e não-reservatório (NR – cor verde) para o poço 3ca24.

Diante do método ANOVA o conjunto de dados apresentou resultados esperados. O p-valor encontrado para as variáveis é zero, sugerindo fortemente que há variação entre suas médias. O mesmo resultado foi observado para o comportamento das médias entre os grupos encontrados com o método SOM. Nota-se forte evidência de variação das médias entre os grupos reservatório e não-reservatório, com chance nula de serem iguais, confirmando o bom desempenho do algoritmo de agrupamento escolhido para implementação desse trabalho.

Os resultados da análise estatística demonstraram forte indicação de interação entre as variáveis e os grupos mencionados, sugerindo que o comportamento de reservatórios e não-reservatórios apresentam alterações de valores das variáveis analisadas (DT, ILD e GR) de maneira distinta, o que é claramente observado mediante análise dos *box-plots*.

Os diagramas *box-plots* apresentam os valores para reservatório e não-reservatório das três variáveis estudadas (RG, ILD e DT). Com estes gráficos é possível observar as amplitudes de variação entre os diferentes atributos estudados e definir a influência de cada variável na decisão de separação por grupos.

A Figura 6a apresenta os *box-plots* da variável RG para os poços 4ca25, 43cpq1, 167b e 109sj160. O poço 4ca25 e 167 estão localizados próximos a cidade de Caçapava, o poço 109sj160 próximo de São José dos Campos e o poço 43cpq1 próximo à cidade de Lorena.

Com exceção do poço 43cpq1, os poços apresentam valores da variável RG bem discriminados entre as classes. É possível constatar que para o poço 43cpq1 a variável dominante para o agrupamento em duas classes é o perfil DT, única dimensão do conjunto em que há nítida diferença entre as classes (Figura 6c). Observa-se também que dentre as variáveis estudadas, RG é a dimensão de maior influência para a separação dos poços 4ca25 e 167.

Analisando a variável resistividade (Figura 6b), nota-se que apenas para o poço 109sj160 há variação significativa entre as classes. Representando um caso muito particular em que a variação de pontos é extremamente alta, ocasionando inclusive muitos pontos que estão fora do intervalo de confiança esperado, incomum nos outros casos.

Contudo, enquanto a variável de maior diferença significativa entre as classes para o poço 109sj160 é representada pela variável resistividade, nota-se pela análise dos gráficos de DT que este poço é que apresenta menor variabilidade. Enquanto os outros três poços apresentaram valores muito distintos entre as classes.

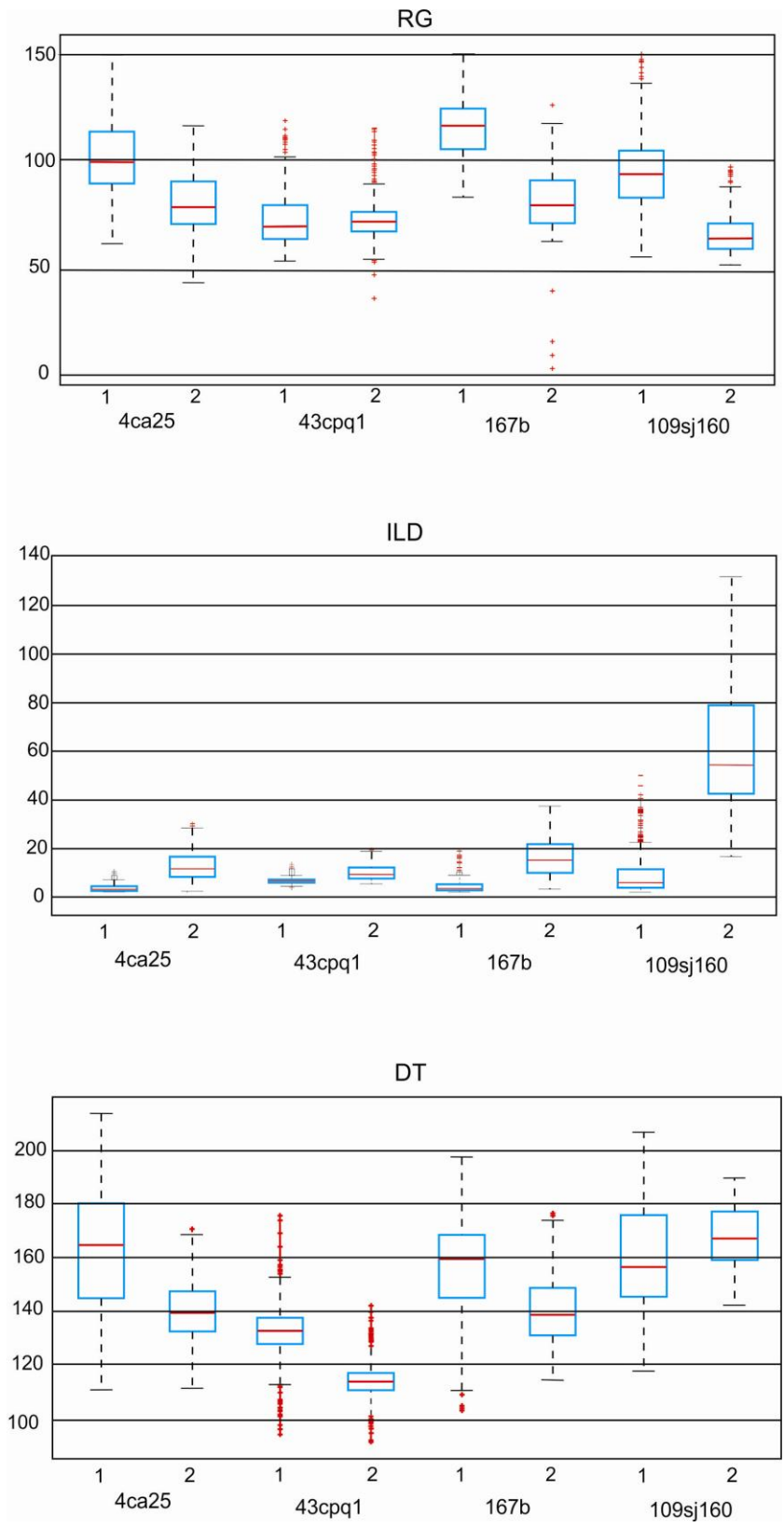


Figura 6 – Box-plots das variáveis RG, ILD e DT, das classes estabelecidas, para os poços 4ca25, 43cpq1,167 e 109sj160.

Nestes exemplos é nítido que cada variável apresenta um comportamento diferente e particular em cada poço analisado, o que dificulta a classificação visual do intérprete e torna-se essencial a utilização de uma ferramenta de classificação automática.

Assim como na classificação visual, a classificação por meio do estudo estatístico apresenta limitações, pois muitas variáveis apresentam comportamento normal clássico impossibilitando a definição de grupos de valores representativos dos atributos litológicos. Dessa forma, por meio de técnicas multivariadas é possível definir as influências corretas de cada uma das variáveis em questão.

Diante das descrições de amostras de calhas, as eletrofácies apresentaram resultados satisfatórios. Apesar da pouca precisão das descrições, essa análise permitiu averiguar a existência de litofácies que caracterizassem a classificação em duas eletrofácies, testando a eficiência do método proposto. A análise possibilitou também verificar as litofácies que representariam a eletrofácies reservatório.

Com base nas descrições de calhas, nas litofácies descritas por Riccomini (1989) e Almeida (2007) (Tabela 1 e 2), e associando características permo-porosas em relação a classe granulométrica e grau de seleção, a eletrofácies reservatório pode ser representada pelos arenitos conglomeráticos, arenitos grossos a médios, arenitos de coloração esverdeada e arenitos finos, e a eletrofácies não-reservatório seria representada pelos conglomerados, diamictitos, siltitos, lamitos, argilitos esverdeados, ritimitos e folhelhos.

As litofácies lamitos arenosos, arenitos com muita matriz argilosa e arenitos finos intercalados com lamitos podem representar uma transição entre as eletrofácies reservatório e não-reservatório.

Vale ressaltar a resolução do perfil que apresenta pontos amostrais a cada 20cm, intercalações inferiores a essa espessura podem dificultar a classificação das eletrofácies.

Tabela 1 - Litofácies identificadas por Riccomini (1989) na Bacia de Taubaté.

CÓDIGO	FÁCIES
A	Diamictitos e conglomerados com matriz lamítica e arenosa arcoseana
B	Lamitos arenosos e arenitos de coloração esverdeada (interdigitados com fácies A, fluidificados)
C	Argilas verdes maciças, localmente com concreções calcíferas
D	Calcários dolomíticos intercalados nas argilas da fácies C
E	Ritimitos formados por alternância de lâminas de folhelhos castanho escuro e margas
F	Arenito médio a grosso com estratificação cruzada, em camadas basais podem ocorrer conglomerados
G	Arenitos grossos arcoseanos, conglomeráticos, com gradação normal até arenitos finos e no topo siltitos bioturbados
H	Arenitos grossos, conglomeráticos com granodecrescência ascendente até siltitos e argilitos
I	Arenitos conglomeráticos com abundante matriz argilosa na base, até siltitos e argilitos no topo
J	Arenitos de granulação média a grossa, que gradam para o topo a sedimentos mais finos, até siltitos e argilitos
Q	Crosta calcíticas associadas às fácies B
R	Nível basal de conglomerado com matriz arenosa, apresenta granodecrescência ascendente

Tabela 2 - Litofácies identificadas por Almeida (2007) nas proximidades de Jacareí (nomeadas por letras de A a I) e na região de Taubaté (nomeadas por algarismos romanos de I a IX).

Código	Fácies	Código	Fácies
A	Arenito conglomerático intraclástico	I	Arenito conglomerático com matriz de areia grossa/média
B	Conglomerado polimítico clasto-suportado	II	Arenito maciço de granulação média/grossa, comum a ocorrência de níveis cimentados por calcita
C	Arenito grosso com grânulos e seixos dispersos na matriz, com estratificação cruzada acanalada	III	Siltito esverdeado maciço com presença de grãos de areia muito grossa dispersos na matriz
D	Arenito grosso com grânulos e seixos dispersos na matriz, maciço	IV	Argilito esverdeado maciço
E	Arenito grosso com grânulos e seixos dispersos na matriz, gradado	V	Arenito muito fino a fino podendo apresentar granulação grossa de areia na matriz
F	Arenito conglomerático	VI	Arenito fino apresentando filmes de lama e níveis intensamente bioturbados
G	Arenito grosso com grânulos e seixos dispersos na matriz, com estratificação cruzada de baixo ângulo	VII	Siltito apresentando níveis com bioturbações intensas
H	Arenito médio a grosso	VIII	Diamictito cinza escuro, contendo fragmentos milimétricos de composição variada dispersos na matriz
I	Siltito/lamito com grânulos e seixos dispersos na matriz	IX	Folhelho cinza escuro carbonoso

Dentre os 33 poços caracterizados pela ferramenta SOM, 13 foram selecionados para correlação de eletrofácies, conforme localização e distância entre eles (Figura 4). A continuidade lateral das eletrofácies reservatório foi interpretada segundo padrões de semelhança existentes nas curvas de RG, ILD e DT entre os poços. A curva do perfil DT foi essencial para identificar padrões semelhantes entre os poços.

Diante da ausência de dados de testemunho para os perfis e da pouca confiabilidade das descrições de calha, buscou-se aqui a correlação das duas eletrofácies definidas, sem a intenção de identificar variações faciológicas em detalhe.

Os poços distam entre 500 e 800 m e as eletrofácies correlacionadas não representam camadas tabulares e contínuas, mas intervalos com maior predomínio de depósitos relacionados a preenchimento de canal, que não podem ser detalhados por ausências de informação e elevada distância entre poços. O principal objetivo deste tipo de interpretação foi de encontrar padrões semelhantes entre unidades deposicionais.

Na correlação obtida nota-se a existência de três unidades sedimentares principais (Figura 7). Na unidade sedimentar inferior os perfis geofísicos apresentam alternâncias de camadas reservatório e não-reservatório, com picos de ILD (valores altos) e RG (valores baixos) bastante expressivos. Por vezes ocorrem níveis representativos de maior argilosidade, porém a porcentagem de rochas reservatório é mais expressiva. A espessura média ocorre em torno de 100m, poços como 29sj140 e 166p144 atingem o embasamento e apresentam para essa unidade espessuras variando entre 40 e 100m.

Na unidade intermediária, o perfil resistividade registra grande decréscimo de valores de resistividade acompanhado por um aumento dos valores de raio gama (Figura 8). Em determinados perfis é possível visualizar um padrão específico de queda da resistividade, atingindo os valores mínimos, assim como padrões semelhantes da curva do perfil sônico. Essa unidade é interpretada

como um nível argiloso, apresentando espessuras entre 20 e 50m, presente em todos os perfis analisados.

Na unidade superior (D), os perfis voltam a apresentar intercalações de fácies reservatório e não-reservatório com espessuras variando entre 100 e 150m. Na região de Caçapava as espessuras da fácies reservatório são mais finas com uma concentração maior de sedimentos argilosos. Nota-se, porém que os poços localizados na margem flexural apresentam maior porcentagem de fácies reservatório.

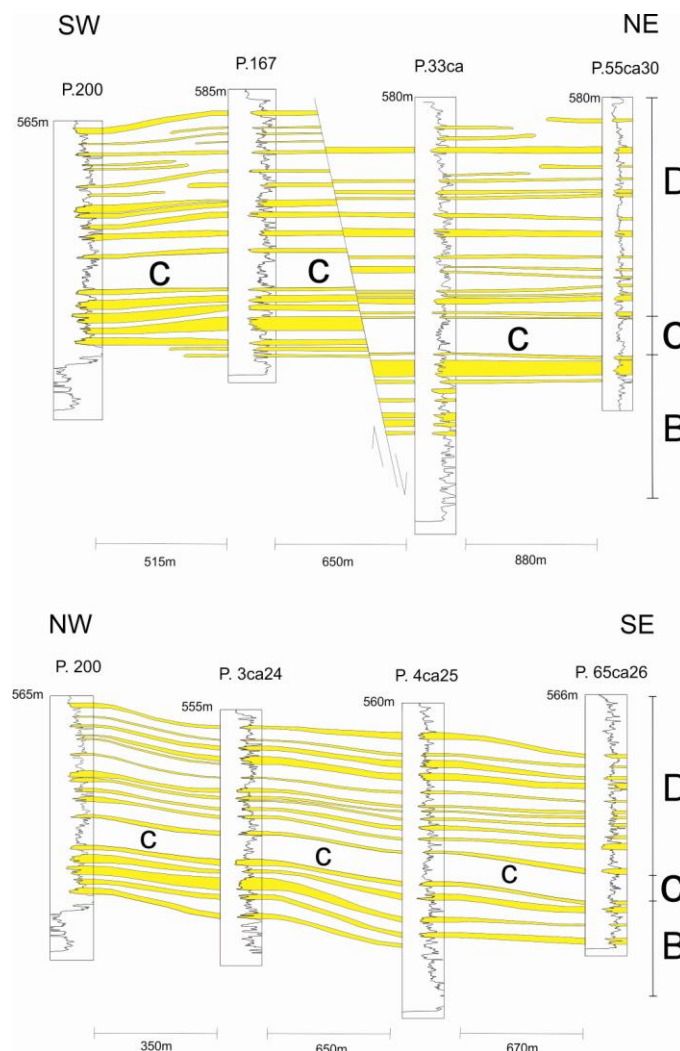


Figura 7 – Correlação das fácies reservatório nos poços próximos à cidade de Caçapava.

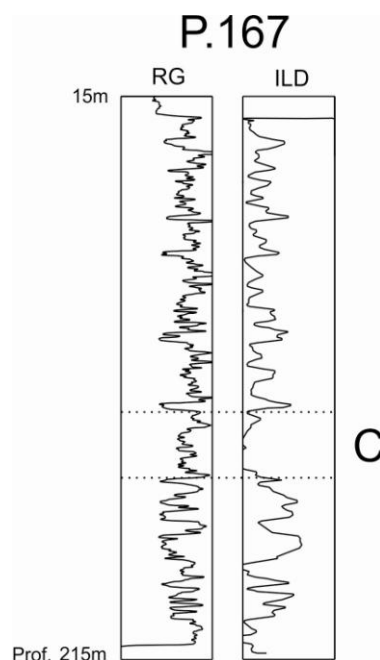


Figura 8 – Perfil geofísico do poço 167 exemplificando a resposta padrão da variável RG e ILD da unidade C nos poços analisados.

Diante da localização dos poços em relação às seções sísmicas do Compartimento São José dos Campos foi possível a correlação das unidades sedimentares definidas nos perfis com unidades sísmicas.

Para a interpretação das seções sísmicas no presente trabalho levou-se em consideração as unidades sedimentares analisadas nos perfis geofísicos e a proposta de Fernandes (1993). De um modo geral as unidades sísmicas definidas pelo autor são condizentes com as unidades aqui definidas, sendo assim utilizou-se a mesma denominação. Contudo foram reinterpretados os horizontes referentes a cada unidade, conseqüentemente as espessuras obtidas são diferentes do trabalho de Fernandes (1993). As unidades sísmicas interpretadas e os poços correlacionados são apresentados na Figura 9 e 10.

A unidade sedimentar inferior definida nos poços, para o compartimento SJC, foi associada à unidade sísmica B, unidade que recobre o embasamento nessa porção da bacia. As características

dos perfis geofísicos e das seções sísmicas para essa unidade seriam condizentes com a interpretação realizada por Fernandes (1993), que a associa a depósitos de sistema fluvial e fluvial-lacustre.

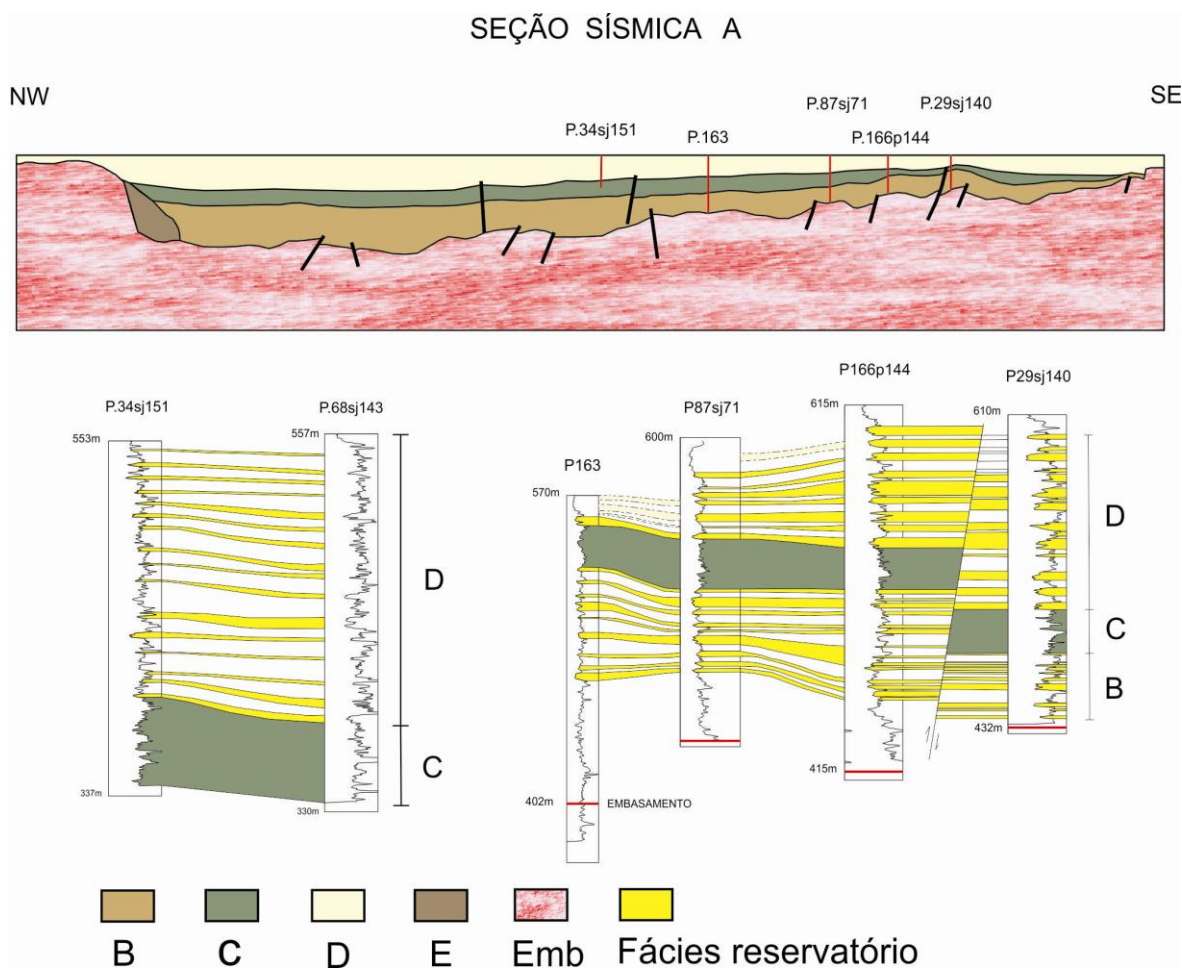


Figura 9 – Correlação das fácies reservatório e distribuição das unidades sedimentares interpretadas na seção sísmica A e nos perfis elétricos.

A unidade intermediária dos perfis foi associada à unidade sísmica C. No Compartimento São José dos Campos a unidade sísmica C apresenta dois tipos de refletores, em porções com subsidência mais acentuada, próximo a falha de borda, as sismofácies são paralelas e bem pronunciadas, porém conforme há um distanciamento em direção a margem flexural as sismofácies são sub-paralelas a caóticas. Essas características estão associadas a uma deposição menos marcante

de sedimentos argilosos em direção a margem flexural. Este fato é evidenciado também pelas menores espessuras da unidade C nos poços analisados.

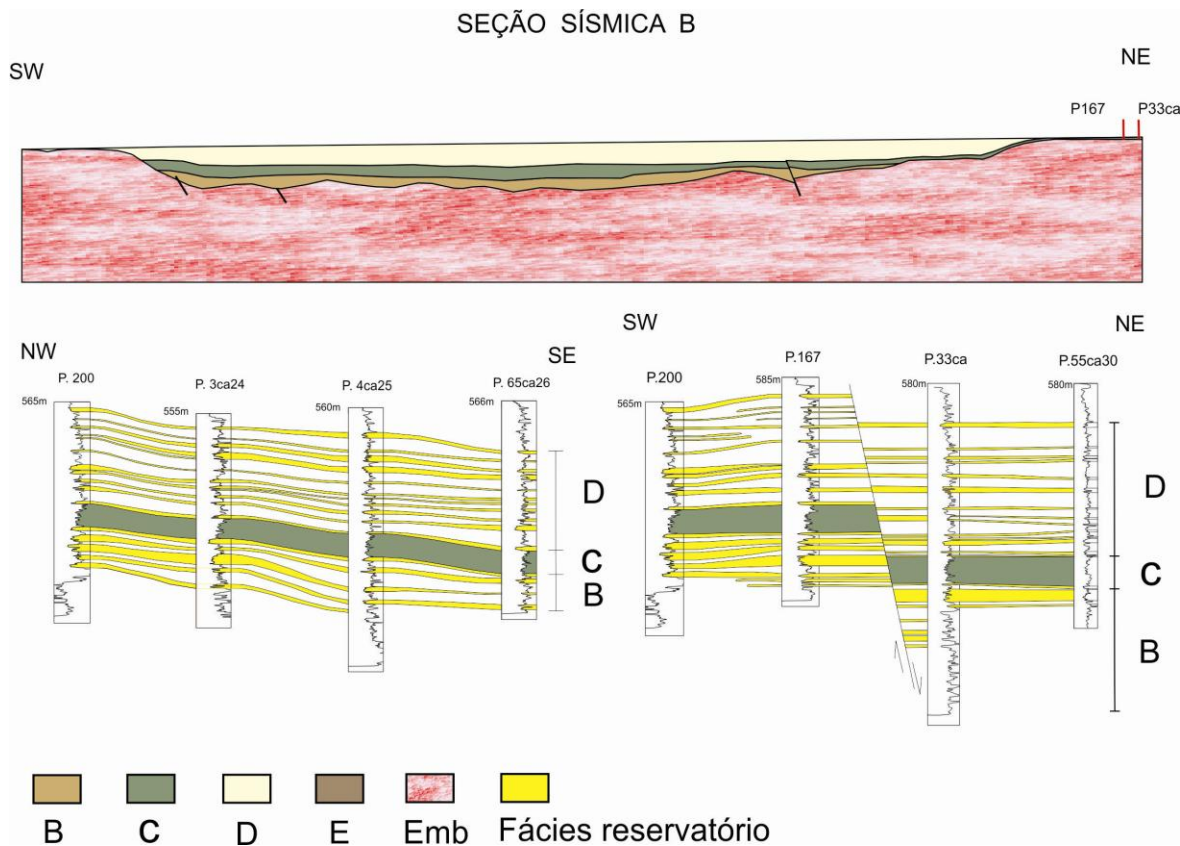


Figura 10 – Correlação das fácies reservatório e distribuição das unidades sedimentares interpretadas na seção sísmica B e nos perfis elétricos.

Segundo Fernandes (1993) o padrão sísmico da unidade C a nordeste do Alto de Caçapava, com excelente continuidade lateral e refletores bem marcados, é compatível com rochas possuidoras de acamamento lateral muito contínuo, caracterizando sedimentação em ambiente lacustre. Na porção a sudoeste do Alto de Caçapava pela presença diferenciada do padrão sísmico, com menor continuidade lateral, ocorreriam depósitos de planícies fluviais. Ainda segundo o autor, diante da

resposta sísmica, durante a deposição da unidade C a sedimentação se espalha por todos os compartimentos da bacia recobrando o Alto de Pindamonhangaba e parte do Alto de Caçapava.

De acordo com os perfis geofísicos, a deposição dessa unidade ultrapassa o Alto de Caçapava atingindo porções próximas à cidade de São José dos Campos. No Compartimento São José dos Campos a unidade C se apresenta como um pacote delgado de sedimentos argilosos, com maior expressividade próximo a falha de borda, associado a um ambiente deposicional de menor energia.

Nessa porção da bacia, esses depósitos podem estar associados a um ambiente lacustre de menor proporção, contemporâneos a deposição dos sedimentos lacustres da Formação Tremembé, esses com grande expressão na porção central da bacia (Compartimento Taubaté).

A unidade superior dos perfis é associada à unidade sísmica D. No Compartimento São José dos Campos as sismofácies dessa unidade ocorrem de forma sub-paralela a caótica, condizente com a resposta dos perfis, com intercalações expressivas da fácies reservatório e não-reservatório. Esse padrão sugere um ambiente deposicional de maior energia, semelhante ao ambiente deposicional da unidade B. Os depósitos da margem flexural apresentam camadas mais espessas da fácies reservatório, evidenciado pelos poços 166p144 e 29sj140, enquanto os depósitos mais próximos a falha de borda apresentam camadas mais finas, exemplificado pelo poço 34sj151.

Analisando a relação entre as unidades estabelecidas na sísmica e nos perfis geofísicos, assim como a localização dos poços diante das seções sísmicas, é possível inferir a direção preferencial da deposição dos sedimentos no Compartimento São José dos Campos.

O Compartimento São José dos Campos é um semigráben com assoalho inclinado para NW, contra a falha mestra de São José (Riccomini et al. 1989; Marques 1990), sendo bem caracterizado pelas seções sísmicas A e B. Diante de suas características, a direção geral esperada do transporte de sedimentos é para o eixo da bacia (NW-SE). Contudo as unidades identificadas nos poços próximos à cidade de Caçapava (Figura 4) são correlacionáveis às unidades da porção central do

semigráben, indicando que a sedimentação ocorre concomitantemente em direção a essa porção da bacia, caracterizando também transporte de oeste para leste (Figura 11).

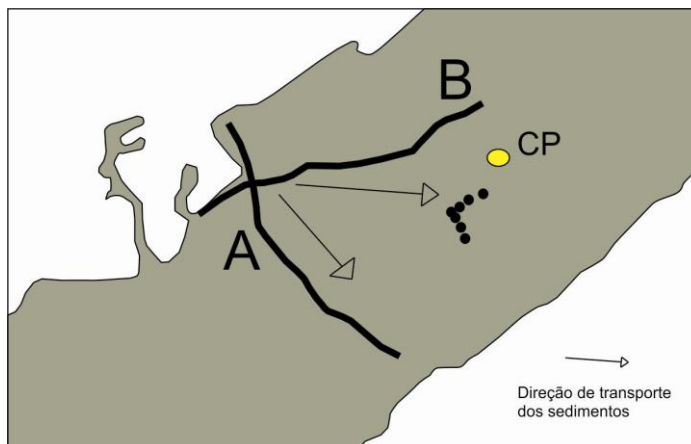


Figura 11 – Representação da direção do transporte de sedimentos no Compartimento São José dos Campos com base na análise dos poços e seções sísmicas

Ainda por meio da análise estratigráfica é possível identificar as principais falhas presentes nesse compartimento. Entre os poços 166p144 e 29sj160 ocorre uma falha normal presente também na seção sísmica A (Figura 9). Esse falhamento pode estar associado ao prolongamento da Falha de Bom Retiro, típica falha de borda que limita o semigráben do Compartimento Taubaté, assim como falhas normais identificadas nessa região por Riccomini (1989), em estudos de campo (Figura 12).

O autor identifica, ainda na região de Caçapava, uma falha transcorrente dextral, ortogonal ao eixo da bacia (Figura 12), caracterizada aqui pela falha existente entre os poços 167 e 33ca, indicando assim uma reativação normal desse falhamento (Figura 10). A seção sísmica B apresenta a localização dessa falha na porção nordeste.

Presente no Compartimento Taubaté a Falha de Quiririm também possui seu prolongamento em direção a cidade de Caçapava, representado pela análise estratigráfica dos poços. Nessa região a posição dos poços tubulares profundos, juntamente com a espessura do pacote sedimentar e

informações sobre a profundidade do embasamento, sugerem a existência de um baixo estrutural, caracterizando a presença de uma falha normal (Figura 12).

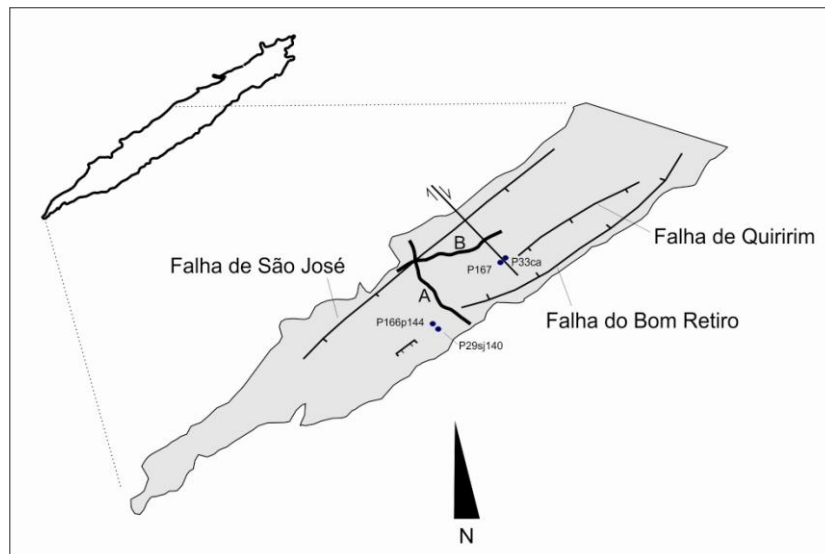


Figura 12 – Representação das principais falhas do Compartimento Taubaté e das seções sísmicas e poços correlacionados.

6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados e das análises realizadas, o método SOM se mostrou satisfatório a fim de caracterizar eletrofácies a partir de dados de perfis geofísicos. Devido à ausência de informações significativas, como dados de testemunhos, este método se torna uma alternativa eficaz permitindo também avaliar qualitativamente os agrupamentos encontrados. Os dados dos perfis geofísicos foram agrupados em duas classes distintas e estão de acordo com a resposta esperada das variáveis RG, ILD e DT para intervalos de rocha reservatório e não-reservatório.

A classificação obtida permitiu a análise em detalhe das fácies no Compartimento São José dos Campos, integrando correlação de poços às seções sísmicas interpretadas na região. A correlação de poços definiu a existência de três unidades sedimentares distintas, compatíveis com unidades sísmicas interpretadas em estudos anteriores, reforçando a proposta de três unidades deposicionais principais para essa porção da bacia.

A unidade inferior (B) recobre o embasamento e apresenta intercalação de fácies reservatório e não-reservatório, ora com níveis de maior argilosidade ora com presença expressiva da fácies reservatório. As características dos perfis e das unidades sísmicas sugerem associação de depósitos de planície fluvial e aluvial, condizentes com a proposta de Riccomini (1989) para os depósitos de leques aluviais distais da unidade basal do Grupo Taubaté.

A unidade intermediária (C) destaca-se por uma queda brusca de valores de ILD acompanhada por valores mais altos de RG caracterizando um pacote sedimentar com grande proporção de fácies não-reservatório. A resposta dos perfis elétricos condiz com a resposta sísmica que apresenta em maior parte refletores paralelos e contínuos. Essa unidade foi interpretada como um depósito

sedimentar de menor energia contemporâneo aos depósitos lacustres da porção central da bacia, associado à fase de maior subsidência da bacia.

Por fim a unidade superior (D) expressão mais recente da sedimentação, volta a apresentar intercalações de fácies reservatório e não-reservatório, com maiores proporções para a fácies reservatório em direção a margem flexural do semigráben que define esse compartimento. Essa unidade estaria associada à depósitos fluviais com expressão mais significativa em direção a borda sudeste e sul da bacia, esta última região da cidade de Jacareí. Esses depósitos são condizentes com a proposta de Riccomini (1989) para a transição dos depósitos fluviais associados a leques aluviais aos depósitos fluviais meandantes da Formação São Paulo e Pindamonhangaba, axiais a bacia.

A correlação dos poços indica no Compartimento São José dos Campos transporte de sedimentos para o eixo da bacia e da porção central do semigráben para leste, em direção a cidade de Caçapava.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, T. C. 2007. Arquitetura deposicional de depósitos de leques aluviais de uma bacia tipo rifte intracontinental, Bacia de Taubaté, São Paulo. Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Appi, C.J., Freitas, E.L., Castro, J. C. Faciologia e estratigrafia da Bacia de Taubaté. *Relatório Interno*, CENPES/PETROBRAS, 1986.
- Baldwin, J.L., Baternan, R.M., Wheatley, C.L. 1990. Application of a neural network to the problem of mineral identification from well logs. *Log Anal.* 3, 279–293.
- Bhatt, A.; Helle, H. 2002. Determination of facies from well logs using modular neural networks. *Pet. Geosci.* 8 (3), 217–228.
- Bishop, C. M. 1994. Neural networks and their applications. *Rev. Sci. Instrum.* 65 (6), 1803-1832.
- Carvalho, A.M.A., Vidal, A.C., Chang, H.K. 2011. Delimitação do Embasamento da Bacia de Taubaté. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, v. 11, n.1, p. 19-32.
- Chang, H.C., Kopaska-Merkel, D.C., Chen, H.C., Durrans, S.R. 2000. Lithofacies identification using multiple adaptive resonance theory neural networks and group decision expert system. *Computers & Geosciences* 26(5), 591–601.
- Coléou, T., Poupon, M., Azbel, K. 2003. Unsupervised seismic facies classification: A review and comparison of techniques and implementation. *Journal The Leading Edge*, 22:942-953.
- Consentino, L. 2001. *Integrated Reservoir Studies*. Paris: Technip, 310p
- Fernandes, F.L. 1993. Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

- Fernandes, J.A.B. Krigagem com deriva externa aplicada à avaliação de recursos minerais de calcário e de minério laterítico. 2009. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Fernandes, F.L. & Chang, H.K. 2001. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté - Vale do Rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19:131-144.
- Freeman, J.A., Skapura, D.M. 1991. *Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques*. Addison-Wesley, Reading, MA, 401 p.
- Gonçalves, M.L., Netto, M.L. de A., Júnior, J.Z. 1996. Um Sistema Neural Modular para Classificação de Imagens Utilizando Mapas de Kohonen, *In: ANAIS VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6º Encontro Nacional de Inteligência Artificial*, p. 845-849.
- Gonçalves, M.L., Netto, M.L.A., Costa, J.A.F. 2007. Explorando as Propriedades do mapa Auto-Organizável de Kohonen na Classificação de Imagens de Satélite. *In: ANAIS DP XXVII CONGRESSO DA SBC*, p.1132-1141.
- Hasui, Y. & Ponçano, W.L. 1978. Organização estrutural e evolução na Bacia de Taubaté. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, v. 1, *Anais...* Recife, Pernambuco, 1978, p. 368-381
- Jolliffe, I.T. 2002. *Principal Components Analysis*. 2nd ed., New York, Springer Series in Statistics, 487 p.
- Kohonen, T. 1982. *Analysis of a simple self-organizing process*. *Biol. Cybern.*, 44:135-140.
- Kohonen, T. 2001. *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag, New York, 501 P.
- Li, Y.; Anderson-Sprecher, R. 2006. Facies identification from well logs: a comparison of discriminant analysis and Naïve Bayes classifier. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.56, p. 149-157.
- Mancini, F. Estratigrafia e aspectos da tectônica deformadora da Formação Pindamonhangaba, Bacia de Taubaté, SP. São Paulo, 1995, Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 107p.

- Marques, A. 1990. 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.
- Matos, M.C., Osório, P.L.M., Johann, P.R.S. 2004. Agrupamento de Mapas Auto Organizáveis de Kohonen Aplicado a Análise de Fácies Sísmicas. *In: XV BRAZILIAN AUTOMATION CONGRESS*, p.6.
- Riccomini, C. O rift continental do sudeste do Brasil. São Paulo, 1989. Dissertação de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Riccomini, C., Coimbra, A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. *In: Negro, J.R.A., Ferreira, A.A.; Alonso U.R.; Luz, P.A. (eds). Solos da Cidade de São Paulo*. São Paulo: ABMS/ABEF, p. 37-94.
- Riccomini, C., Sant'anna, L. G., Ferrari, A. L. 2004. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. *In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., et al. (eds). Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 1 ed., São Paulo, Beca Produções Culturais Ltda, cap. 23.
- Ripley, B.D. 1996. *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge University Press, Cambridge, 403 p.
- Stundner, M.; Oberwinkler, C. 2004. Self-Organizing Maps for Lithofacies Identification and Permeability Prediction. *In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION*, Houston, p.8.
- Tang, H., White, C.; Zeng, X.. Gani, M.; Bhattacharya, J. 2004. Comparison of multivariate statistical algorithms for wireline log facies classification. *AAPG ANNUAL MEETING ABSTRACT*, vol. 88, p. 13.
- Tang, H., White, C. 2008. Multivariate statistical log-log-facies classification on a shallow marine reservoir. *J. Pet. Sci. Eng.*, 61: 88-93.
- Thomas, J. E. 2004. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2. Ed. Rio de Janeiro: *Interciência: Petrobras*.
- Vesanto, J., Himberg, J., Alhoniemi, E.; Parhankangas, J. 1999. Self-Organizing Map in Matlab: The SOM Toolbox. *In: PROCEEDING OF THE MATLAB DSP CONFERENCE*, p.59.

ANEXO 3

“Carvalho, A.M.A., Vidal, A.C., Bueno, J.F., Kuroda, M. C.,
Modelagem geológica de reservatórios fluviais da Bacia de
Taubaté, SP (para submissão).”

Modelagem geológica de reservatórios fluviais da Bacia de Taubaté, SP.

Ancilla Maria Almeida de CARVALHO¹, Alexandre Campana VIDAL¹, Juliana Finoto BUENO¹,
Michelle Chaves KURODA¹

(1) Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). R. Pandiá Calógeras, 51 CEP: 13083-970. Campinas, SP. Caixa Postal: 6152.
Endereços eletrônicos: ancilla.carvalho@ige.unicamp.br; vidal@ige.unicamp.br;
mckuroda@ige.unicamp.br; juliana.bueno@ige.unicamp.br

RESUMO – Este artigo descreve a modelagem geoestatística de reservatórios fluviais da Bacia de Taubaté, que compõem o Sistema Aquífero Taubaté, uma das principais fontes de exploração de água do Estado de São Paulo. O estudo foi desenvolvido na porção sudoeste da bacia, a partir de dados sísmicos e de perfilagem geofísica. Com auxílio do *software* de modelagem geológica Irap-RMS e com a aplicação de métodos matemáticos e geoestatísticos, foi gerada uma base de dados para a interpolação das informações. As atividades compreenderam a construção do modelo tridimensional do arcabouço estrutural da bacia, da distribuição de fácies sedimentares, da conectividade do sistema aquífero e do cálculo do volume poroso da porção estudada. Os resultados mostraram boa relação com o modelo conceitual geológico e hidrogeológico da área.

Palavras-chave: Bacia de Taubaté, modelagem geoestatística, conectividade, aquífero

ABSTRACT – This paper describes geostatistical modeling of fluvial reservoirs of Taubaté Basin, which makes up the Aquifer Taubaté, a major source of water exploration in the State of São Paulo. The study was conducted in the southwestern portion of the basin, from seismic data and geophysical profiles. With the help of geological modeling software Irap-RMS and the application of mathematical methods and geostatistical was generated a database of information for interpolation. The activities included the construction of three-dimensional model of the structural framework of the basin, the distribution of sedimentary facies, the connectivity of the aquifer system and calculating the porous volume of the portion studied. The results showed good relationship with the geological and hydrogeological conceptual model of the area.

Keywords: Bacia de Taubaté, geostatistical modeling, connectivity, aquifer.

1. INTRODUÇÃO

A modelagem de reservatórios requer a combinação de modelos estratigráficos complexos e simulações geoestatísticas (Eschard et al. 1998). Na análise estratigráfica é importante o entendimento da unidade genética que incorpora a fácies reservatório e suas heterogeneidades, produzindo modelos geológicos conceituais; enquanto na análise geoestatística são adotados modelos matemáticos e probabilísticos para a representação tridimensional do reservatório.

O modelo geológico conceitual tem como objetivo principal prever a extensão do reservatório e sua arquitetura, reduzindo assim incertezas na interpretação e na modelagem de diferentes unidades genéticas (Gardner e Cross, 1993). Tais modelos são essenciais na escala de reservatório, contudo, frequentemente a densidade de informações não permite a representação de heterogeneidades internas (Haldorsen e Damsleth, 1990).

A simulação geoestatística é utilizada para a representação e entendimento das variabilidades internas e espaciais das propriedades do reservatório. Uma maneira mais apropriada de caracterizar determinada propriedade é gerar, ao invés de uma única imagem, diferentes realizações equiprováveis. Dessa forma a simulação estocástica fornece múltiplas imagens equiprováveis de distribuição de uma propriedade, com o objetivo de reproduzir um espectro total da variabilidade espacial (Rosseto, 1998).

O objetivo da modelagem estocástica é gerar realizações sintéticas, mas estatisticamente realistas, a partir de dados limitados para o reservatório em estudo, honrando informações disponíveis em pontos conhecidos e simulando dados entre eles, por meio de um conjunto de regras estatísticas e de condições definidas pelo usuário. Essas condições podem incluir a geometria e distribuição de objetos referentes as fácies; a orientação, distribuição e comprimentos de falhas; a

distância de correlação de parâmetros contínuos; a covariância de parâmetros dependentes (Haldorsen e Damsleth, 1990; Keogh et al. 2007).

As diferentes realizações da simulação estocástica apresentam uma regularidade estatística, ou seja, eventos complexos envolvidos nos processos sedimentares (sedimentação, erosão, soterramento, compactação física, deformação e cimentação por diagênese) conferem aos reservatórios propriedades físicas (porosidade e permeabilidade) que apresentam um comportamento aleatório quando analisadas num conjunto pequeno de medidas. Porém a análise estatística de um número grande de medidas destas propriedades revela uma regularidade no seu comportamento, o que permite modelar as suas distribuições espaciais (Lima, 2007).

Dentre os métodos estocásticos, os baseados em sequência, como a Simulação Sequencial Guassiana (SSG) e a Simulação Sequencial da Indicatriz (SSI) (Deutsch e Journel, 1997), geram valores de uma propriedade em malhas, utilizando informação geoestatística de relações entre valores de locações vizinhas, podendo basear-se em variogramas ou em distribuições de probabilidade condicional para quantificar padrões sequenciais de variação espacial (Dubrule, 1989).

Na SSG, cada variável é simulada sequencialmente de acordo com a sua função de distribuição acumulada condicional gaussiana. A cada etapa, os dados condicionantes são todos os valores originais somados a todos os valores previamente simulados que se encontram dentro de uma vizinhança da posição a ser simulada (Oliveira, 1997).

Na SSI, as funções de distribuição condicionais são estimadas segundo o formalismo da indicatriz. Os dados de entrada podem representar uma variável categórica ou então uma variável contínua, que é transformada em classes disjuntas. A lei de distribuição em cada ponto representa o histograma de probabilidades da sua localização, pertencente a cada uma das categorias

consideradas. Pode-se dizer que se trata de um método não paramétrico, no sentido em que se caracterizam direta e localmente, por krigagem, as leis de distribuição (Journel, 1989).

Com isso, por meio de métodos geoestatísticos, esse trabalho tem como objetivo a caracterização de reservatórios fluviais que compõem o sistema aquífero Taubaté, formado pelos sedimentos paleógenos da Bacia de Taubaté. O estudo se concentra no Compartimento São José dos Campos, porção sudoeste da bacia (Figura 1) onde há maior densidade de informação, e tem como foco a modelagem tridimensional das fácies sedimentares, das propriedades petrofísicas, da conectividade da fácies reservatório, caracterizando também o volume poroso da área em questão.

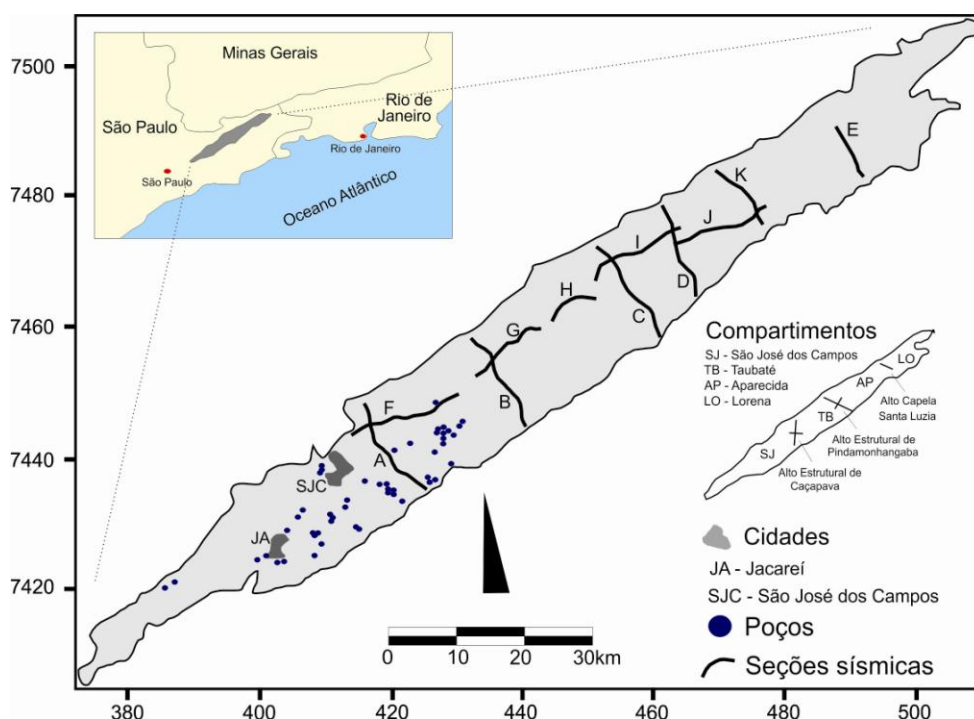


Figura 1 – Mapa de localização da área em estudo. Em detalhe a localização da Bacia de Taubaté no Estado de São Paulo, compartimentação estrutural e localização de poços e linhas sísmicas utilizadas no estudo.

2. 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 cenozóica, posicionada entre as Serras do Mar e Mantiqueira, na porção leste do estado de São Paulo.

O arcabouço da bacia é formado por semigrábens, separados por zonas de transferências ou de acomodação, com depocentros invertidos e leques aluviais associados às falhas de borda, em típica geometria de bacia do tipo rifte (Fernandes 1993). Fernandes & Chang (2001, 2003) propõem a subdivisão em três compartimentos, denominados de sudoeste para nordeste, de São José dos Campos, Taubaté e Aparecida, separados por dois altos estruturais internos, altos de Caçapava e Pindamonhangaba. Carvalho et al. (2011), por meio de métodos geoestatísticos e a partir de dados sísmicos, gravimétricos e de poços, propõem a subdivisão da bacia em quatro depocentros principais, corroborando a proposta de Marques (1990) para a sub-bacia Lorena na porção nordeste da bacia, separada do Compartimento Aparecida pelo Alto da Capela de Santa Luzia (Figura 1).

A Bacia de Taubaté apresenta sedimentação tipicamente continental e, segundo Riccomini (1989), o preenchimento pode ser dividido em duas fases: a primeira, sintectônica 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 2).

Appi et al. (1986) e Chang et al. (1989), utilizando-se da análise de sequência, dividem a evolução sedimentar da Bacia de Taubaté em três fases principais. A fase I corresponde ao desenvolvimento de um sistema de leques aluviais, com a deposição de fácies de fluxo gravitacional, caracterizadas por lamitos e lamitos arenosos (Formação Resende). Com a continuidade da subsidência se instala a fase II, correspondente a um sistema lacustre, que se

estende até o seu ápice, durante a deposição de folhelhos betuminosos da região de Tremembé (Formação Tremembé). Nesta fase ocorrem cheias esporádicas que propiciam a deposição de corpos de inunditos nas bordas dos lagos, e um evento de ressecamento responsável pela formação de uma camada de calcário tipo caliche. A fase III corresponde à implantação de um sistema fluvial meandrante que persiste até o Holoceno (Formação São Paulo e Pindamonhangaba).

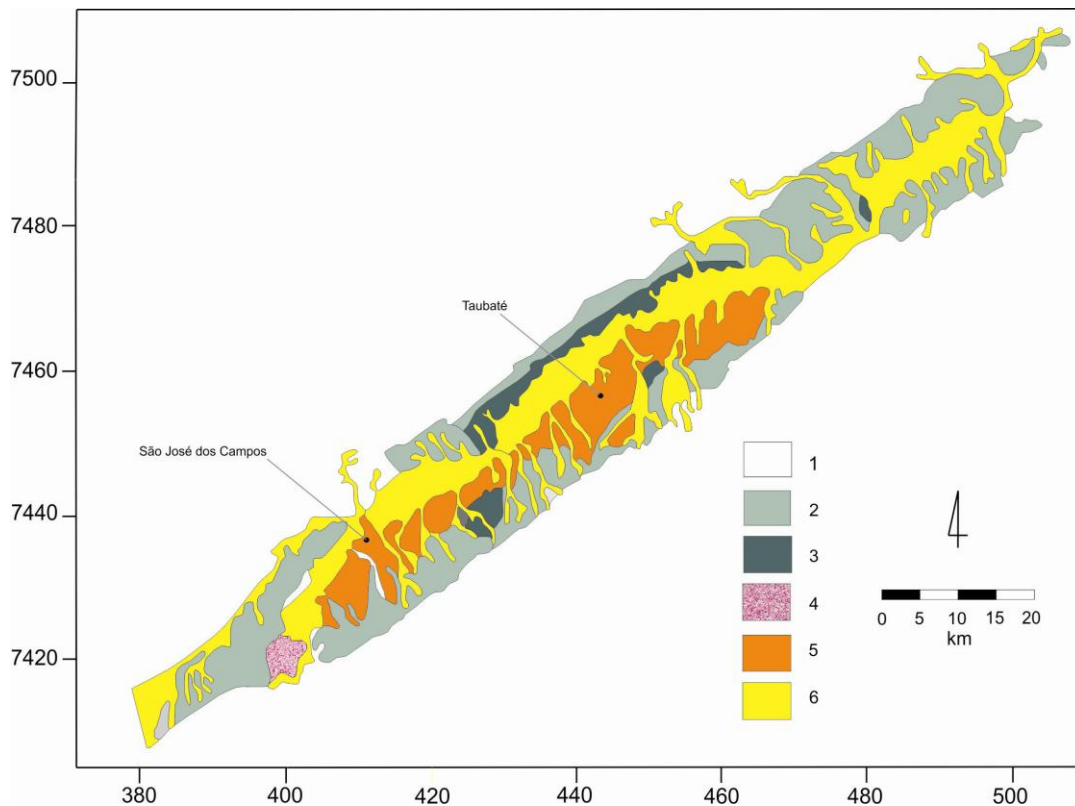


Figura 2 – Mapa geológico esquemático da Bacia de Taubaté. (1) rochas do embasamento; (2) Formação Resende; (3) Formação Tremembé; (4) Formação São Paulo; (5) Formação Pindamonhangaba; (6) sedimentos quaternários (Modificado de Riccomini, 1989).

No estudo da estratigrafia das bacias de idade paleógena dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, Riccomini (1989) identifica vinte fácies que foram agrupadas nos sistemas deposicionais correspondentes. Segundo o autor, a principal fase de desenvolvimento do RCSB ocorreu no Eoceno-Oligoceno, com o preenchimento sedimentar sintectônico representado pelo Grupo Taubaté.

Das vinte fácies identificadas onze possuem boas representações na porção sul e central da Bacia de Taubaté

A Formação Resende, unidade basal e lateral do Grupo Taubaté, apresenta depósitos de sistema de leques aluviais associados a planícies aluviais de rios entrelaçados. 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 et al. 2004).

As rochas conglomeráticas predominam ao longo da borda norte das bacias do segmento central do RCSB, onde foram depositadas por processos de fluxos gravitacionais subaéreos. Na Bacia de Taubaté ocorrem próximo as falhas de borda, aflorando na borda norte do Compartimento Aparecida e sul do Compartimento Taubaté. As porções medianas e distais dos leques aluviais são representadas por lamitos e lamitos arenosos maciços, por vezes conglomeráticos, que interdigitam-se lateralmente com os depósitos de leques aluviais proximais. As porções mais distais de leques aluviais podem conter acumulações locais de matéria orgânica (linhito) de espessura centimétrica a decimétrica (Riccomini et al. 2004).

Almeida (2007) a partir de descrições detalhadas de perfis sedimentológicos situados na borda sudeste da bacia, proximidades de Jacareí, define a existência de nove fácies sedimentares, dentre elas conglomerados, arenitos conglomeráticos, arenito médio grosso e siltito maciço. Os afloramentos estudados representariam um sistema de leques aluviais de clima árido depositados na borda flexural do compartimento sul do rifte.

Na porção central da bacia, Almeida (2007) descreve um trecho testemunhado onde reconhece também a existência de nove fácies: arenito conglomerático, arenito médio maciço, siltito maciço, argilito maciço, arenito muito fino, arenito fino, siltito com bioturbações, diamictito e folhelho, que

representariam uma sedimentação de leques aluviais na borda falhada do compartimento central do rifte.

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 & Coimbra, 1992). A partir de dados de sondagens e afloramentos, as principais litofácies reconhecidas na Formação Tremembé compreendem: argilitos verdes maciços, ritmitos de folhelhos e margas, dolomitos e arenitos (Riccomini, 1989; Riccomini et al. 1992).

A unidade topo do Grupo Taubaté é a Formação São Paulo, representada por depósitos sedimentares relacionados a sistemas fluviais meandrantos. As principais litofácies da Formação São Paulo são arenitos grossos, conglomeráticos com estratificações cruzadas, base erosiva e presença de clastos argilosos, representantes de depósitos de canais meandrantos; siltitos e argilitos laminados, às vezes fossilíferos (linhitos), depositados em meandros abandonados; e arenitos médios a grossos com sedimentos de rompimento de diques marginais, gradando para sedimentos mais finos, rítmicos e laminados de planície de inundação (Riccomini et al. 2004).

Recobrimo discordantemente os depósitos da Formação Tremembé, Resende e São Paulo ocorrem os depósitos da Formação Pindamonhangaba, que corresponde a um sistema fluvial meandrante desenvolvidos na porção central e sudoeste da Bacia de Taubaté. 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 Membro Presidente Dutra relacionado a deposição em planície de inundação de sistema fluvial meandrante de granulação fina.

Os aquíferos da Bacia de Taubaté são caracterizados pela interdigitação de arenitos e lamitos, sendo assim denominados de aquíferos multicamada. Localmente adota-se o aquífero dividido em vários sub-aquíferos, segundo o número de camadas aquíferas no perfil, contudo devido à forma

lenticular das camadas selantes não se pode diferenciar os sub-aquíferos em termos regionais, podendo-se assumir que os mesmos estejam interligados hidrologicamente (Vidal, 1997).

Tesseidre e Mariano (1978) pesquisaram as possibilidades hidrológicas da Bacia de Taubaté e relacionaram a diferenciação litológica com as características dos aquíferos. A fácies lacustre possui aquíferos de má qualidade, enquanto no restante da bacia a fácies marginal e fluvial proporcionam aquíferos de boa qualidade.. Os aquíferos teriam um comportamento livre a semiconfinado, não existindo barreiras impermeáveis que permitissem diferenciá-los hidrologicamente, apenas em regiões restritas são registrados condições de artesianismo.

As regiões de São José dos Campos e Lorena são consideradas as mais promissoras para a exploração de água subterrânea, com vazões que variam de 10 a 200 m³/h, enquanto a região central, entre os municípios de Taubaté e Pindamonhangaba, apresenta características menos favoráveis à exploração, com vazões situadas entre 20 e 30 m³/h (DAEE, 1977; Tesseidre e Mariano, 1978).

3. ETAPAS DE TRABALHO

A base de dados para a modelagem envolve a definição de superfícies limitantes da bacia, superfícies de falhas, caracterização e correlação de fácies, e cálculo de parâmetros petrofísicos.

Os dados iniciais disponíveis compreendem informações de 63 poços tubulares profundos, localizados nas regiões das cidades de Jacareí, São José dos Campos e Caçapava, e 11 seções sísmicas 2D, localizadas ao longo de toda a bacia (Figura 1). Os dados de perfilagem geofísica foram concedidos pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) e apresentam curvas de raios gama (GR), resistividade (ILD), sônico (DT) e potencial espontâneo (SP). Os dados sísmicos foram adquiridos pela PETROBRAS em 1988 e concedidos para o presente trabalho pela ANP – Agência Nacional de Petróleo.

A modelagem foi desenvolvida no *software* Irap-RMS® da Roxar para um bloco inserido no Compartimento São José dos Campos (Figura 5) e as etapas de estudo compreendem: (1) construção do modelo estrutural; (2) construção do modelo geológico; (3) cálculo de conectividade dos reservatórios; (4) preenchimento do modelo geológico com propriedades petrofísicas e (5) cálculo do volume poroso.

3.1 Construção do modelo estrutural

A modelagem estrutural consiste na modelagem de superfícies que limitam os intervalos dos reservatórios. O modelo estrutural é constituído por um modelo de falhas que juntamente com as superfícies limitantes de topo e base da bacia geram um bloco que serve de arcabouço para a construção da malha geológica.

A delimitação do embasamento foi obtida por meio do método de krigagem com deriva externa a partir de dados sísmicos, gravimétricos e de poços tubulares profundos (Carvalho et al. 2011). O mapa do embasamento realça quatro depocentros principais na bacia e três altos estruturais, o depocentro que marca o Compartimento São José dos Campos, região alvo deste trabalho, é basculado para noroeste (Figura 3)

O mapa de topo da bacia foi obtido por meio da interpolação de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) da área onde está inserida a Bacia de Taubaté, constando a cota altimétrica de toda a superfície (Figura 4).

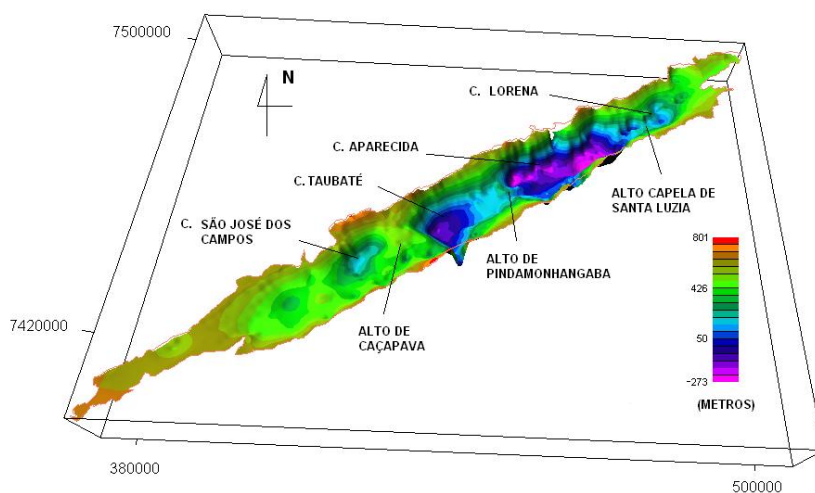


Figura 3 – Mapa do embasamento da Bacia de Taubaté.

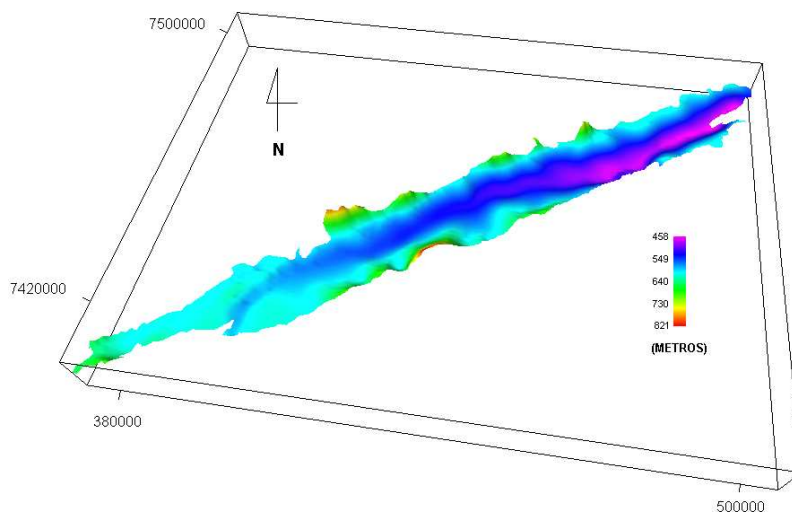


Figura 4 – Mapa da superfície do topo da Bacia de Taubaté.

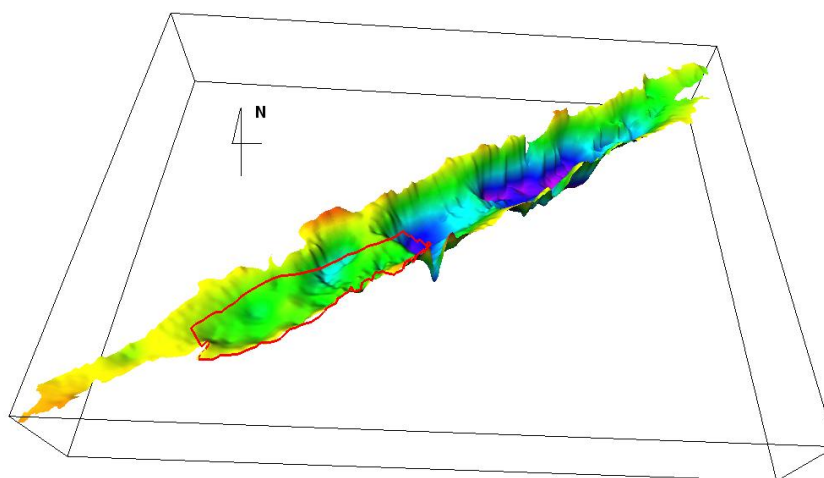


Figura 5 – Área de estudo (em vermelho) inserida no Compartimento São José dos Campos.

A análise de seções sísmicas, de perfis elétricos e o estudo da superfície do embasamento permitiram a delimitação das principais superfícies de falhas presentes na Bacia de Taubaté. Foram identificadas as falhas de borda dos semigrábens que definem os principais compartimentos da bacia, assim como falhas internas no Compartimento São José dos Campos.

As falhas de borda foram interpretadas em seções sísmicas e falhas internas foram delimitadas a partir da correlação dos poços e dados sísmicos. A delimitação das falhas em profundidade foi

realizada por meio do *software* OpendTect®, utilizando dados sísmicos, e pelo deslocamento na distribuição da litologia em poços próximos. A delimitação em superfície foi realizada por interpretação do mapa de contorno estrutural de embasamento de Fernandes (2003) e do mapa geológico de Riccomini (1989).

Para a linha de falha interpretada em profundidade foi estabelecido um ângulo de inclinação, o qual foi utilizado para determinar a inclinação dos demais pontos da falha em superfície. Com essas informações obteve-se uma planilha de dados com localização e profundidade de uma falha de borda e uma falha interna entre os Compartimentos São José dos Campos e Taubaté, área relevante para o presente estudo (Figura 6). A partir do modelo estrutural gerou-se uma malha geológica com resolução de células de 200 x 400 x 1m (Figura 6).

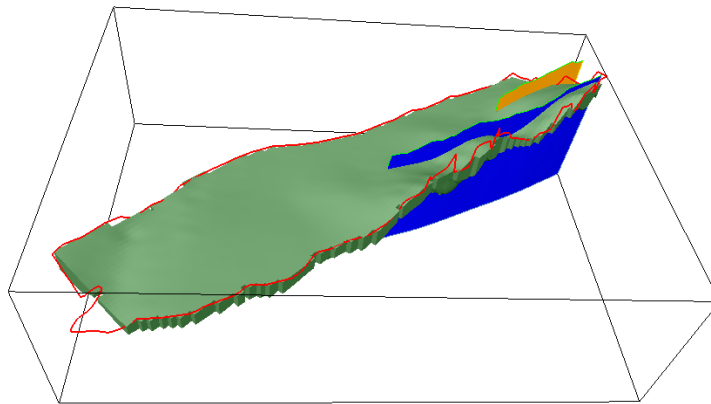


Figura 6 – Perspectiva da malha geológica e das duas falhas utilizadas no modelo estrutural.

3.2 Construção do modelo geológico

A definição das fácies sedimentares foi realizada a partir da aplicação da técnica de redes neurais Mapa Auto-organizáveis de Kohonen (SOM – Self-Organizing Map) em dados de perfis geofísicos. Essa técnica, desenvolvida por Kohonen (1982), tem o intuito de fornecer mapas temáticos ordenados a partir de dados de entrada, após agrupamento (Freeman e Skapura, 1991; Ripley, 1996).

O objetivo do algoritmo é mapear o conjunto de dados de entrada em um espaço de dimensão inferior, delineado por uma estrutura geométrica, chamada de mapa auto-organizável (Kohonen, 2001). A ferramenta produz assim a similaridade entre os dados de entrada e gera mapas para a visualização de agrupamentos de dados multidimensionais, transformando relações estatísticas entre dados de alta dimensão em relações geométricas simples dos pontos correspondentes no espaço de dimensão inferior.

Tendo como característica a abordagem não supervisionada, este método permite a auto-adaptação do algoritmo a qualquer base de dados de entrada e possibilita assim o reconhecimento de padrões de conjuntos de dados sem informações *a priori*. Desta forma não se faz necessária a classificação visual prévia dos dados para posterior análise computacional.

Os dados de poços foram digitalizados e adequados a aplicação do método SOM para a determinação da litologia (eletrofácies). A classificação realizada, com base nos perfis, é não-supervisionada, ou seja, não é guiada por dados de testemunhos. Com isso, os resultados obtidos correspondem as características dos perfis que estão associadas a cada grupo encontrados pelo método .

Para o conjunto de dados foram realizados testes com o método SOM para diferente número de grupos: 2, 3 e 4 eletrofácies. A melhor classificação encontrada para o grupo de perfis foi em duas eletrofácies distintas, que após análise dos resultados foram classificadas como reservatório e não-reservatório (Figura 7). A fácies reservatório apresenta baixos valores de raio gama e altos de resistividade, referentes a intervalos com presença de água de baixa salinidade (potável). Como a maioria das fácies descritas na bibliografia é composta por sedimentos siliciclásticos, os baixos valores de RG representam os arenitos limpos, referentes a intervalos aquíferos pela associação com o perfil resistividade.

Para o processo de modelagem de fácies foi realizada a regularização das informações para a dimensão vertical da malha geológica. Os dados de fácies foram regularizados com a função peso, utilizada para selecionar os códigos de valores dominantes para cada célula

Após a regularização é realizado um controle de qualidade por meio de análise estatística básica, conferindo se o processo de regularização foi eficiente. A Figura 8 mostra os poços regularizados e a comparação estatística entre os dados de fácies, regularizados e originais.

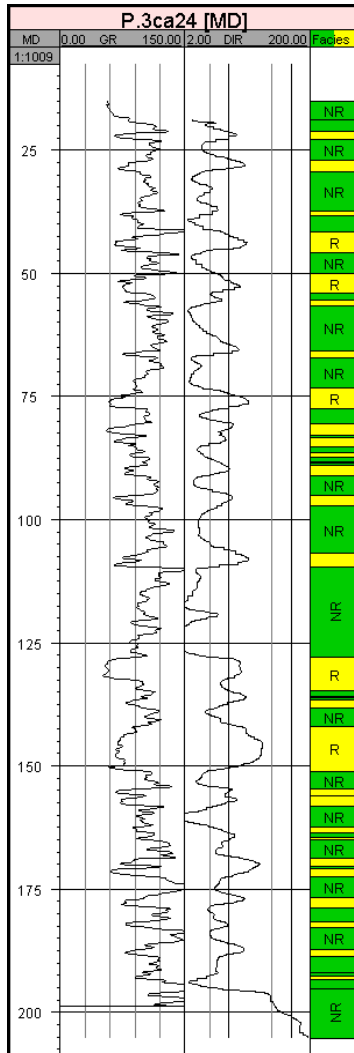


Figura 7 – Exemplo de classificação em fácies reservatório (R – cor amarela) e não-reservatório (NR – cor verde) para o poço 3ca24.

O processo de regularização deve preservar as características fundamentais dos dados. Assim é esperado que as porcentagens de cada uma das fácies não sofram alterações significativas após a regularização. A Figura 8b mostra que o dado original apresenta 65,4% de fácies não-reservatório e 34,6% de fácies reservatório, após a regularização essas porcentagens são, respectivamente, 65% e 35% (Figura 8c).

A modelagem de fácies foi construída utilizando a Simulação Sequencial da Indicatriz. Para esse algoritmo o primeiro parâmetro a ser definido é a proporção de fácies reservatório. Esta

proporção é obtida a partir do histograma dos dados regularizados ou através de uma curva de proporção vertical (CPV). A Figura 9 apresenta a CPV para a distribuição das fácies, fornecendo a proporção para cada nível do espaço, que reflete as variações verticais e o processo deposicional que governou a distribuição (Ravenne et al. 2002).

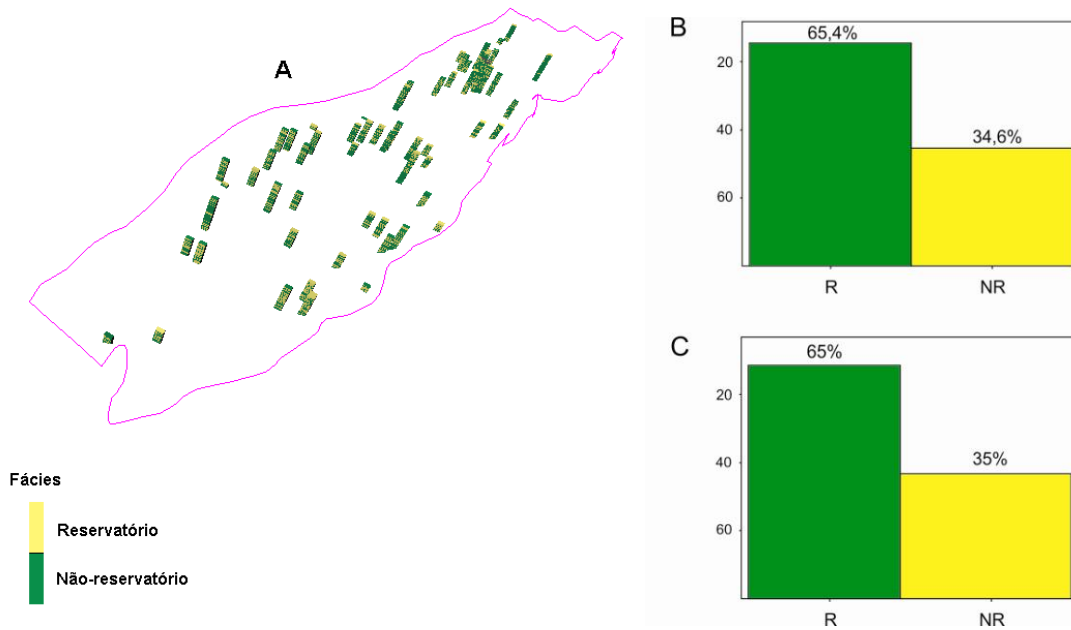


Figura 8 – (A) Dados de poços distribuídos em colunas definidas pela proporção de cada fácies, (B) Histograma dos dados de fácies originais, (C) histograma dos dados de fácies regularizados.

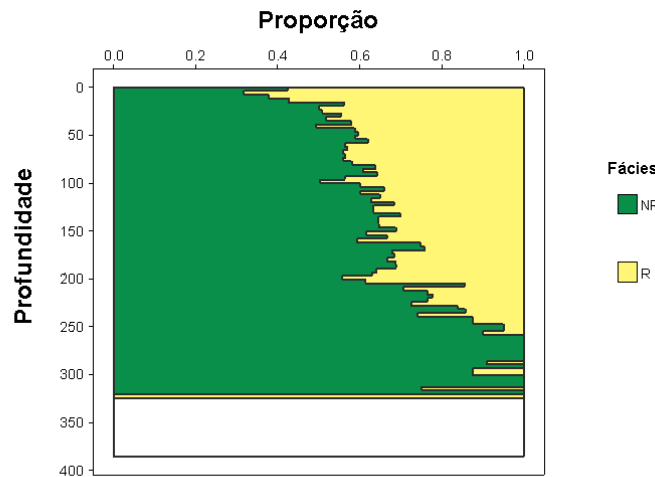


Figura 9 – Curva de proporção vertical com a distribuição das fácies no bloco estudado

Além da proporção de fácies faz-se necessário determinar o variograma das fácies reservatório e não-reservatório. Foi gerado um modelo variográfico baseado no variograma experimental e foram estabelecidos alcances e patamares nas direções principais do variograma. O variograma experimental indica azimute de 135 para a melhor correlação dos dados, condizente com o modelo geológico conceitual da área, que indica preenchimento sedimentar principal em direção ao eixo da bacia.

Nesta etapa foram gerados cem modelos de distribuição de fácies pelo método SSI. O resultado da modelagem de uma das realizações é apresentado na Figura 10a. O controle de qualidade da modelagem é avaliado por meio de um histograma, mostrando se a modelagem foi realizada de modo consistente. O histograma da modelagem é representado na Figura 10b. Comparando os histogramas da Figura 8 com a Figura 10 nota-se que não há variação significativa entre os dados.

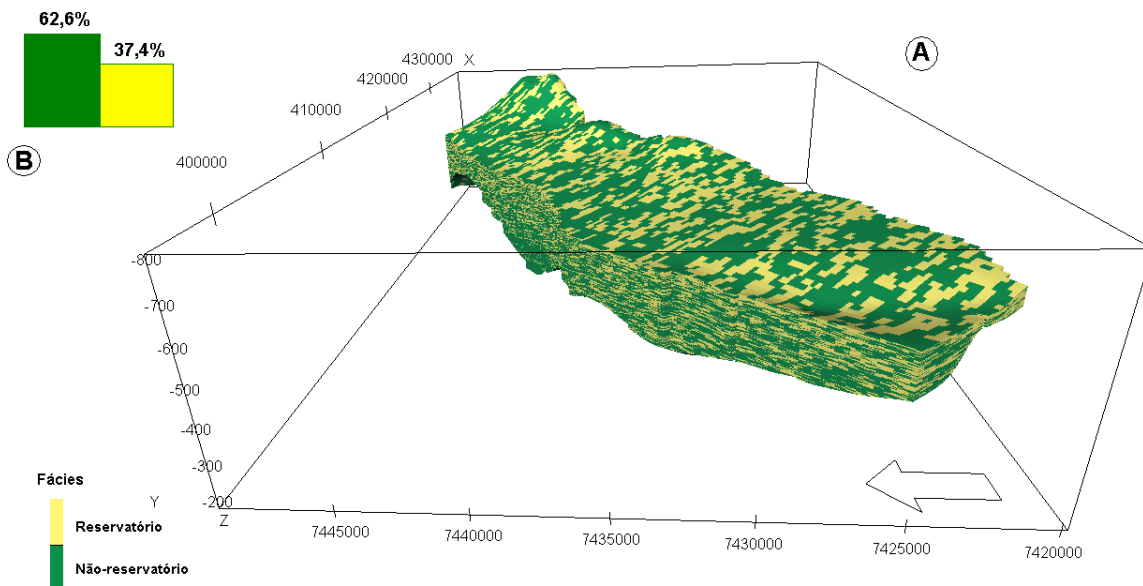


Figura 10 – Distribuição das fácies no bloco modelado (A) e histograma do modelo de fácies gerado pela SSI (B).

3.3 Cálculo da conectividade dos reservatórios

A partir do modelo de fácies, o cálculo da conectividade das fácies reservatório foi realizado. Neste cálculo é investigado o volume de células conectadas, com a geração do modelo tridimensional correspondente para visualização.

Os dados de entrada incluem o modelo tridimensional contendo a associação de fácies e parâmetros de restrições, como códigos que indiquem a fácies de interesse para o estudo de conexão, nesse caso a fácies reservatório.

O objetivo da simulação estocástica é apresentar as possíveis realizações que possam representar de forma quantitativa o leque de possibilidades e definir cenários otimistas e pessimistas. No caso da conexão dos reservatórios, uma série de resultados pode ser gerada a partir das realizações obtidas pela simulação estocástica da distribuição de fácies. Estes resultados têm como objetivo localizar regiões onde o erro (desvio padrão) é maior ou tem probabilidade superior a um determinado valor de corte. Outro objetivo da análise por métodos estocásticos é gerar cenários probabilísticos como P10, P50 e P90, por exemplo, onde se associa os percentis P10 à estimativa otimista, P50 à mais provável e P90 à estimativa pessimista, do parâmetro de desempenho analisado.

Assim, para o cálculo de conectividade dos reservatórios foram utilizadas as cem realizações de distribuição de fácies, obtendo-se uma média de valor em torno de 97% de interconexão da fácies reservatório.

3.4 Preenchimento do modelo de fácies com a propriedade porosidade

Para o modelo petrofísico da porção estudada é necessário o cálculo de porosidade, que indica o volume da rocha que efetivamente pode conter fluido. A determinação desse parâmetro pode ser realizado em laboratório ou por meio de dados de perfilagem.

As ferramentas de perfilagem para as medidas de porosidade são os perfis densidade, neutrão e sônico. O perfil utilizado para a determinação de porosidade na Bacia de Taubaté é o perfil sônico, devido à ausência de dados de densidade e neutrão. O perfil DT registra o tempo que um pulso sonoro leva para atravessar um intervalo de formação (Serra, 1986; Rider, 2000), com valores diretamente relacionados à porosidade da rocha.

Wyllie et al. (1956) por meio de estudos laboratoriais propõem uma relação entre porosidade e intervalo de tempo da viagem acústica:

$$\Delta t = \Delta t_{ma}(1 - \phi_s) + \Delta t_{\phi}\phi_s \quad (1)$$

onde Δt é o tempo de trânsito adquiridos no perfil, Δt_{ma} o tempo de trânsito da matriz, Δt_{ϕ} o tempo de trânsito do fluido e ϕ_s a porosidade. Os valores do tempo de trânsito da matriz comumente usados estão listados na Tabela 1, com valores entre 55,5 e 51 $\mu\text{s}/\text{ft}$ para arenitos. O valor comumente utilizado para o tempo de trânsito dos fluidos no caso de aquíferos é de 189 $\mu\text{s}/\text{ft}$.

Tabela 1 – Velocidade sônica e intervalo de tempo de trânsito, comumente usado, para diferentes matrizes (Schulumberger, 1972)

	V_{ma} (ft/s)	Δt_{ma} (Φ_s /ft)
ARENITO	18000-19500	55,5-51
CALCÁRIO	21000-23000	47,6-43
DOLOMITA	23000-26000	43,5-38,5
ANIDRITA	20000	50
SAL	15000	57

A Eq. 1 é universalmente utilizada para quantificar a porosidade em arenitos consolidados e carbonatos com porosidade intergranular (Kamel et al. 2002). Contudo apresenta alguns pontos fracos diante de abordagens teóricas e práticas. Assim, Raiga-Clemenceau et al. (1988) trabalhando com extensivos conjuntos de dados experimentais propõem uma nova Eq.:

$$\Phi_s = 1 - \left(\frac{\Delta t_{ma}}{\Delta t} \right)^{1/x} \quad (2)$$

Onde Φ_s é a porosidade, Δt é o tempo de trânsito adquirido no perfil, Δt_{ma} o tempo de trânsito da matriz, e $1/x$ o expoente específico relacionado à natureza da matriz (Tabela 2).

Tabela 2 – Tempo de trânsito da matriz e expoente usado na equação do fator de formação acústica (Raiga-Clemenceau et al. 1988)

<i>MATRIZ</i>	$\Delta_{ma} (\Phi_s/ft)$	<i>x</i>
ARENITO	55,5	1,6
CALCITA	47,6	1,76
DOLOMITA	43,5	2

Kamel et al. (2002) estabelecendo uma relação entre as equações de Wyllie et al. (1956) e Raiga-Clemenceau et al. (1988), e a partir de testes com litologias distintas propõem uma nova Eq.:

$$\Phi_s = \sqrt{\frac{(\Delta t - \Delta t_{ma}) (\Delta t^2/x - \Delta t_{ma}^2/x)}{\Delta t^2/x (\Delta t_{\phi} - \Delta t_{ma})}} \quad (3)$$

O parâmetro x pode ser obtido pela seguinte Eq.:

$$x = 55.196 \Delta t_{ma}^{-0.8843} \quad (4)$$

Segundo os autores, o que torna a Eq. 3 mais confiável e mais vantajosa em detrimento das outras é que esta equação integra a maioria dos parâmetros que afetam a porosidade de forma compatível, aumentando a precisão da estimativa do parâmetro em questão.

Dessa forma com os valores dos tempos de trânsito dos perfis sônicos da Bacia de Taubaté aplicou-se a Eq. 3, obtendo-se os valores de porosidade para 23 poços.

Após a regularização dos dados foram realizados os histogramas da distribuição da porosidade em cada fácies e o resultado mostrou que não há inconsistência entre a informação original e a contida nas células geradas para a modelagem.

Para a modelagem da porosidade foi utilizado o método de Simulação Sequencial Gaussiana para o qual são necessários alguns processamentos prévios. A variável porosidade precisa ser transformada para a distribuição gaussiana e então simulada. Ao final do processo aplica-se uma transformação inversa retornando a variável para seu valor original. A simulação utiliza o modelo de distribuição e o variograma como parâmetros de controle. A Figura 11 apresenta a distribuição da porosidade por fácies para a realização 38, representativa do cenário P50.

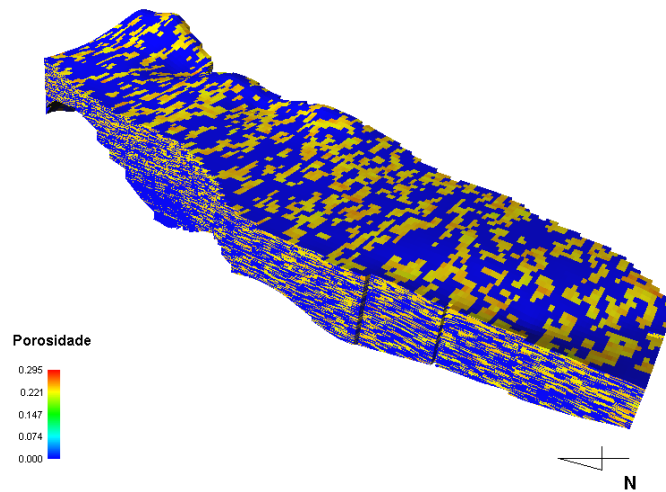


Figura 11 – Modelo de distribuição da porosidade no bloco estudado.

3.5 Cálculo do volume poroso

Nesta etapa foram calculados os volumes porosos para cada um dos modelos gerados pela combinação das simulações de fácies e porosidade, definindo um histograma de distribuição para estes volumes. A partir deste histograma de distribuição volumétrica foi possível definir os modelos responsáveis pelos volumes P10, P50, P90 e para qualquer outro percentil (Figura 12).

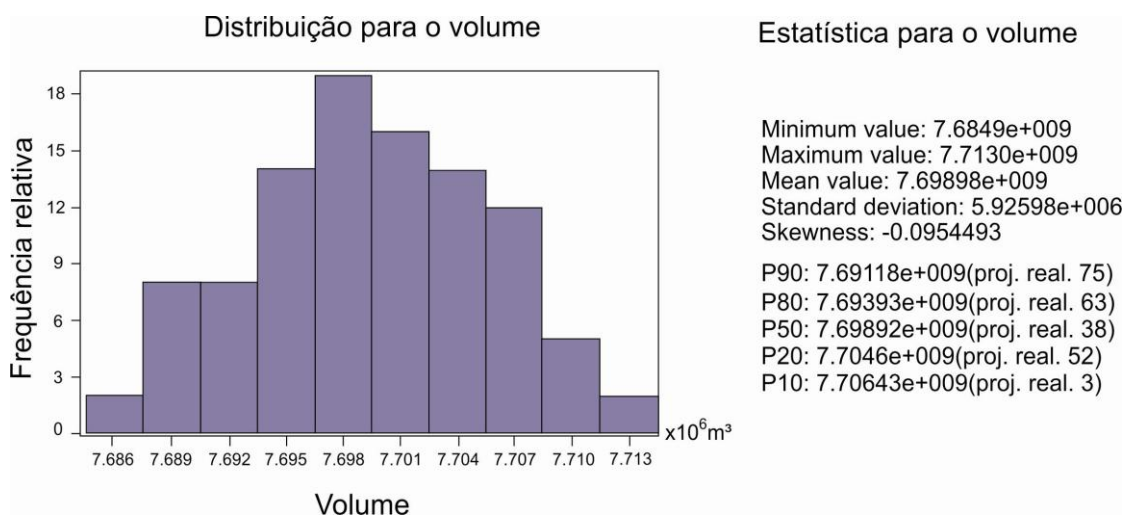


Figura 12 – Estatística dos volumes porosos obtidos após modelagem dos dados.

4. DISCUSSÃO

Do modelo de fácies gerado para o Compartimento São José dos Campos 37,4% é representativo de fácies reservatório e 62,6% de fácies não-reservatório. Esta proporção se mostra condizente com a distribuição esperada para essa porção da bacia, onde a subsidência ocorre de modo mais discreto havendo assim uma maior proporção de depósitos fluviais.

Dos diferentes cenários gerados é visível a maior proporção de fácies reservatório em direção a extremidade sudoeste do compartimento, acompanhando a diminuição do depocentro, fato evidenciado pela maior quantidade de poços para a captação de água nessa região. Os depósitos

sedimentares se distribuem preferencialmente em direção ao eixo da bacia, condição esperada para os depósitos de leques aluviais distais e proximais dessa área.

Do total da porcentagem de fácies reservatório (37,4%), 36,2% das células estão conectadas. Assim o cálculo de conectividade a partir das cem realizações geradas apresentou uma média com um valor alto, 97%, demonstrando boa conexão dos aquíferos. O valor obtido está de acordo com o comportamento de um sistema aquífero livre, que caracteriza o Sistema Aquífero Taubaté, reforçando a propriedade de sub-aquíferos interligados hidrologicamente.

Os diferentes cenários do modelo de porosidade permitiram o cálculo do volume poroso do Compartimento São José dos Campos chegando a um valor base (P50) de $7,69892 \times 10^6 \text{ m}^3$. Diante da boa conexão dos reservatórios o volume em questão ocorre de modo satisfatório.

5. CONCLUSÃO

A partir da integração de dados sísmicos e de perfilagem geofísica foi possível gerar um modelo geológico tridimensional do Compartimento São José dos Campos da Bacia de Taubaté. A área estudada apresenta aquíferos de qualidade, fornecendo boa quantidade de informações geológicas a partir de poços tubulares profundos, que permitem o estudo em subsuperfície de reservatórios fluviais da região.

O modelo geológico computacional foi construído levando-se em conta o modelo geológico conceitual dessa porção da bacia, honrando assim direções preferenciais da distribuição dos depósitos sedimentares, analisadas previamente. A integração de métodos matemáticos e geoestatísticos possibilitaram a construção de uma extensa base de dados sobre o embasamento da bacia, fácies sedimentares e propriedades petrofísicas.

Em posse do modelo geológico do compartimento foi possível a realização de diversas análises em relação às características e distribuição da fácies reservatório. A análise da conectividade estática mostrou que na porção estudada a distribuição dos reservatórios proporciona alta conectividade reforçando a característica de aquífero livre para o Sistema Aquífero Taubaté.

A análise das propriedades petrofísicas gerou bons valores de porosidade para os reservatórios e apesar da quantidade limitada desse tipo dado os resultados da modelagem mostraram boa correlação conferindo uma estimativa confiável do volume poroso dessa porção da bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, T. C. 2007. Arquitetura deposicional de depósitos de leques aluviais de uma bacia tipo rifte intracontinental, Bacia de Taubaté, São Paulo. Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Appi, C.J., Freitas, E.L., Castro, J. C. Faciologia e estratigrafia da Bacia de Taubaté. *Relatório Interno*, CENPES/PETROBRAS, 1986.
- Carvalho, A.M.A., Vidal, A.C., Chang, H.K. 2011. Delimitação do Embasamento da Bacia de Taubaté. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, v. 11, n.1, p. 19-32.
- Chang, H.C., Kopaska-Merkel, D.C., Chen, H.C., Durrans, S.R. 2000. Lithofacies identification using multiple adaptive resonance theory neural networks and group decision expert system. *Computers & Geosciences* 26(5), 591–601.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1977. *Estudo de águas subterrâneas da região administrativa 3 (São José dos Campos e Faixa Litorânea), SP*. São Paulo, DAEE, 175p.
- Deutsch, C. V., Journel, A. G. 1992. *GSLIB: Geostatistical Software Library and Users Guide*. Oxford University Press.
- Dubrule, O. 1988. A review of stochastic models for petroleum reservoirs. In: ARMSTRONG M (ed) *Geostatistics*, Dordrecht: Kluwer Academic Press, 2:493-500. 1989. [International Geostatistics Congress, 3, Avignon-France, Sep5-9, Proceedings]
- Eschard, R.; Lemousy, P.; Bachiana, C.; Desaubliaux, J.; Parpant, J.; Smart, B. 1998. Combining sequence stratigraphy, geostatistical simulation, and production data for modeling a fluvial reservoir in Chaunoy Field (Triassic, France): *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, v. 82, p. 545-568.

- Fernandes, F.L. 1993. Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté - SP. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Fernandes, J.A.B. Krigagem com deriva externa aplicada à avaliação de recursos minerais de calcário e de minério laterítico. 2009. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Fernandes, F.L. & Chang, H.K. 2001. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté - Vale do Rio Paraíba do Sul, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19:131-144.
- Freeman, J.A., Skapura, D.M. 1991. *Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques*. Addison-Wesley, Reading, MA, 401 p.
- Gardner, M. H., Cross, T. A. 1993. Incorporating depositional and preservational process systems in reservoir characterization: examples from the Ferron Sandstone, Utah, USA. *IN: Eschard, R.; Doligez, B. Subsurface reservoir characterization from outcrop observations: Paris*, Editions Technip, 1993, p. 171–172.
- Haldorsen, H. H., Damsleth, E. 1990. Stochastic modeling. *Journal of Petroleum Technology*, v. 42, no. 4, p. 404–412.
- Journel, A. G. 1989. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Washington, D. C., American Geophysical Union, 40 p.
- Kamel, M. H., Mabrouk, W. M., Bayoumi, A. I. 2002. Porosity estimation using a combination of Wyllie-Clemenceau equations in clean sand formation acoustic logs. *Journal of petroleum Science and Engineering*, v. 33, p. 241-251.
- Keogh, K. J., Martinius, A. W., Osland, R. 2007. The development of fluvial stochastic modeling in the Norwegian oil industry: A historical review, subsurface implementation and future directions. *Sedimentary Geology*, 202, 249-268.
- Kohonen, T. 1982. *Analysis of a simple self-organizing process*. *Biol. Cybern.*, 44:135-140.

- Kohonen, T. 2001. *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag, New York, 501 P.
- Lima, L. M. S. 2007. Modelagem geostatística de atributos geológicos em reservatórios turbidíticos. Campinas, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Mancini, F. Estratigrafia e aspectos da tectônica deformadora da Formação Pindamonhangaba, Bacia de Taubaté, SP. São Paulo, 1995, Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 107p.
- Marques, A. 1990. 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.
- Oliveira, M. L. 1997. Análise das incertezas envolvidas na modelagem de reservatório no contexto geostatístico. Campinas. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica/Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Raiga-Clemenceau, J.; Martine, J.P., Nicoletis, S. 1988. The concept of acoustic formation factor for more accurate porosity determination from sonic transit time data. *Log Anal.*, p. 54– 60.
- Riccomini, C. O rift continental do sudeste do Brasil. São Paulo, 1989. Dissertação de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Riccomini, C., Coimbra, A.M. 1992. Geologia da bacia sedimentar. *In*: Negro, J.R.A., Ferreira, A.A.; Alonso U.R.; Luz, P.A. (eds). *Solos da Cidade de São Paulo*. São Paulo: ABMS/ABEF, p. 37-94.
- Riccomini, C., Sant'anna, L. G., Ferrari, A. L. 2004. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. *In*: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., et al. (eds). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, 1 ed., São Paulo, Beca Produções Culturais Ltda, cap. 23.
- Rider, M. 2000. *The Geological Interpretation of Well Logs*. Sutherland, Scotland. Second Edition, Rider-French Consulting Ltd, 280 p.

- Ripley, B.D. 1996. *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge University Press, Cambridge, 403 p.
- Rosseto, J. A. 1998. Incertezas associadas à caracterização de reservatório utilizando dados sísmico de poços com uma abordagem geoestatística. 1998. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Serra, O. 1996. *Fundamentals of Well-Log Interpretation – 2. The Interpretation of Logging Data*, Developments in Petroleum Science (15B). Elsevier Science Publishers B.V. 684p.
- Tesseidre, J. M., Mariano I. B. 1978. Possibilidades hidrológicas da Bacia de Taubaté. *SBG*. 6: 3003-3011.
- Vidal, A. C. 1997. Caracterização hidrogeoquímica dos compartimentos estruturais da Bacia de Taubaté. São Paulo, 1997. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A.R., Gardner, L.W. 1956. Elastic waves velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics* 21 (1), 41–70.