

**Sabrina Belmonte Pereira**

**ANÁLISE CICLOESTRATIGRÁFICA DO INTERVALO  
MICROCLÁSTICO OLIGOCÊNICO DA BACIA DE TAUBATÉ  
(FORMAÇÃO TREMEMBÉ), ESTADO DE SÃO PAULO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
(Bacharelado em Geologia)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2007



UFRJ

**Sabrina Belmonte Pereira**

**ANÁLISE CICLOESTRATIGRÁFICA DO INTERVALO MICROCLÁSTICO  
OLIGOCÊNICO DA BACIA DE TAUBATÉ (FORMAÇÃO TREMEMBÉ), ESTADO  
DE SÃO PAULO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(es):

Leonardo Borghi (UFRJ)  
Luis Paulo Vieira Braga (UFRJ)

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2007

PEREIRA, Sabrina Belmonte  
Análise cíclicoestratigráfica do intervalo  
microclástico

**oligocênico da bacia de Taubaté (Formação Tremembé),  
Estado de São Paulo /** Sabrina Belmonte Pereira  
- - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007.

xii, 35 p. : ill.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso  
(Bacharelado em Geologia) – Universidade  
Federal do Rio de Janeiro, Instituto de  
Geociências, Departamento de Geologia,  
2007.

Orientador(es): Leonardo Borghi, Luis  
Paulo Vieira Braga

1. Geologia. 2. Paleontologia e  
Estratigrafia – Trabalho de Conclusão de  
Curso. I. Leonardo Borghi (UFRJ). II.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Instituto de Geociências.

**Sabrina Belmonte Pereira**

ANÁLISE CICLOESTRATIGRÁFICA DO INTERVALO MICROCLÁSTICO  
OLIGOCÊNICO DA BACIA DE TAUBATÉ (FORMAÇÃO TREMEMBÉ), ESTADO DE  
SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador(es):

Leonardo Borghi (UFRJ)  
Luis Paulo Vieira Braga (UFRJ)

Aprovada em: 17.dezembro.2007

Por:

---

Orientador: Leonardo Borghi (UFRJ)

---

Luis Paulo Vieira Braga (UFRJ)

---

Carlos Jorge de Abreu (UFRJ)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2007

Dedico este trabalho aos meus pais, Tania e Gilmar, por todo apoio e compreensão durante todos esses anos.

## Agradecimentos

Aos meus pais, Tânia e Gilmar, Muffy, meu tio Salvador, minha tia Elizabeth e minha vó Marilda por toda ajuda e apoio que sempre me foi dado em todas as minhas decisões pessoais e acadêmicas.

Ao Carlos Tavares que foi uma inspiração durante os últimos quatro anos de faculdade, além de ter sido motivo das maiores alegrias.

Ao meu orientador, Leonardo Borghi, pelas discussões, correções e principalmente pela oportunidade de me envolver neste trabalho.

Ao co-orientador, professor Dr. Luis Paulo, Vieira Braga pela grande ajuda, paciência e atenção que foi dada durante a parte inicial deste trabalho.

Ao professor Dr. Carlos Jorge de Abreu (GEDAP) por disponibilizar os dados para a realização deste trabalho.

Ao pessoal do Lagesed Leonardo Caixeta, Marina Abelha, Reynaldo Pires, Gabriel, Thiago Denck, Freiman, Ana Paula, Stephan, Guilherme, Luis Maurício, que sempre tornaram os dias de trabalho mais divertidos; principalmente Juliana Sampol e Alexandre Braga que contribuíram de uma forma direta para com o desenvolvimento do trabalho.

A todas as pessoas, que de uma maneira ou de outra me ajudaram durante estes anos de universidade.

## Resumo

PEREIRA, Sabrina. **Análise cicloestratigráfica do intervalo microclástico oligocênico da bacia de taubaté (Formação Tremembé), estado de São Paulo.** 2007. xii, 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A Formação Tremembé (Oligoceno) possui geometria tabular, com espessura máxima conhecida de cerca de 400 m; constitui uma sucessão de rochas essencialmente microclásticas (argilitos, folhelhos, ritmitos, arenitos e calcários) com elevado teor de carbono orgânico total (COT), interpretada, através da análise de fácies (lito- e microfácies) em afloramento, como o registro de um sistema lacustre fechado, oligomítico e eutrófico desenvolvido em uma bacia de rifte em clima semiárido. A correlação estratigráfica entre rochas microclásticas mostra-se extremamente dificultada em virtude de não se identificarem camadas-guia (camadas-de-evento ou marcos estratigráficos), mesmo a curtas distâncias. Com isso, o trabalho busca contribuir para a correlação destas rochas através de um estudo cicloestratigráfico, observando assim o controle astronômico na sedimentação. Com isso, o objetivo do trabalho é estudar os ciclos deposicionais impostos na sedimentação das rochas da Formação Tremembé em um poço de sondagem (PINDA-02-SP), através de uma análise espectral em perfil de raios-gama, com a finalidade de estimar o tempo mínimo de acumulação do intervalo. O estudo cicloestratigráfico na Formação Tremembé mostrou o possível controle astronômico, durante a sua sedimentação. Tendo sido identificados no intervalo M180–M200 períodos de excentricidade curta, 2 de obliquidade longa e precessão longa e curta, associados à ciclos de 25,47 m; 14,76 m; 11,70 m; 8,77 m; 7,90 m e 5,03 m respectivamente; no intervalo M200–M260, períodos de excentricidade curta, obliquidade longa e precessão longa e curta, associados à ciclos de 38,54 m; 13,38 m; 9,46 m e 6,81 m respectivamente; e no intervalo M260 até a superfície, períodos de excentricidade curta, 2 de obliquidade curta e precessão longa e curta, associados à ciclos de 49,37 m; 19,03 m; 16,12 m; 10,46 m e 7,78 m respectivamente. Os doze ciclos, associados ao período de excentricidade curta, bem marcados ao longo do perfil de rios-gama do poço PINDA-02-SP permitiram estimar um tempo mínimo de sedimentação de 1,2 do intervalo.

## Abstract

**PEREIRA, Sabrina. Ciclostratigraphy analysis of the microclastic Oligocene interval of Taubaté basin (Tremembé Formation), São Paulo state.** 2007. xii, 35 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Tremembé Formation (Oligocene), with tabular geometry and thickness up to 400 m, is composed predominately of microclastic rocks (argillite, shale, rhythmites, sandstone). Its facies analysis points to a closed lacustrine system, of oligomitic and eutrophic character, developed under semi-arid conditions. The stratigraphy correlation of wells is extreme difficulty due to the lack of easily identifiable stratigraphic markers (event-beds) even in short distances. To resolve this problem, the cyclostratigraphy analysis is an alternative stratigraphy correlation. The objective of this study consists in detect astronomic forcing phenomena in the sedimentary register of Tremembé Formation (Taubaté basin) in a well bor (PINDA-02-SP), with a spectral analysis of geophysical logging (GR), to determine the sedimentation duration. The Tremembé formation was divided in 3 intervals, and the results showed that its sedimentation was forcing by an astronomic phenomenon. Were identified in the lower interval (M180–M200) orbital cycles of short-term eccentricity, 2 long-terms obliquity and long and short-term precession (25,47 m; 14,76 m; 11,70 m; 8,77 m; 7,90 m and 5,03 m, respectively); in the interval meddle interval (M200–M260) orbital cycles of short-term eccentricity, long-term obliquity and long and short-term precession (38,54 m; 13,38 m; 9,46 m and 6,81 m, respectively); in the interval upper interval (M260) up orbital cycles of short-term eccentricity, 2 short-terms obliquity and long and short-term precession (49,37 m; 19,03 m; 16,12 m; 10,46 m and 7,78 m, respectively). The 12 eccentricity cycles permitted to estimate the minimum time to sediment the Formation that was the 1,2 ky.

## Lista de figuras

**Figura 1** - Representação dos 3 ciclos orbitais principais definidos por Milankovitch (Imbrie & Imbrie, 1979 *apud* Freitas, 2006), os quais controlam as variações climáticas históricas entre  $10^4$  e  $10^6$  anos.

**Figura 2** - Mapa de localização das bacias do RCSB, com destaque para bacia de Taubaté (Fernandes, 1993).

**Figura 3** – Mapa de contorno estrutural do embasamento sísmico da bacia de Taubaté (Molinari, 2003), onde cores avermelhadas indicam altos e azuladas depressões, com indicação aproximada do poço PINDA-02-SP.

**Figura 4** - Diagrama estratigráfico e evolução tectono-sedimentar proposto por Riccomini (1989) para o segmento central do RCSB, com destaque para a Formação Tremembé.

**Figura 5** – Modelo deposicional proposto por Sant'Anna (1999), caracterizado por leques aluviais, rio entrelaçado e lagos rasos e restritos.

**Figura 6** – Modelo deposicional proposto por Torres-Ribeiro (2004) para a Formação Tremembé: A) leques aluviais da Formação Resende, com fan-deltas (A1) e lobos deltaicos distais (A2); B) planície lamosa/paludal com canais rasos (B1) e C) lago, com nível d'água variável, ora recobrindo a planície lamosa ora expondo o substrato, desenvolvendo gretas de contração. Eventuais fluxos gravitacionais distais recobriam essa planície exposta.

**Figura 7** - Correlação dos perfis de raios-gama dos poços, feita por Sampol (2007), onde são observados os marcos elétricos (M100—M260), as sucessões de eletrofácies (SEF1—SEF6) e as eletrosseqüências (ES100 e ES200). Em destaque o marco M120 (início da sedimentação da Formação Tremembé). O intervalo de estudo é aquele entre o M180 até a superfície.

**Figura 8** – Fluxograma esquemático para análise espectral de uma série temporal.

**Figura 9** – Periodograma do intervalo M180 – M200 com os valores de espessura (25,47 m; 14,76 m; 11,70 m; 8,77 m; 7,90 m e 5,03 m) dos ciclos correlacionáveis com o perfil de raios-gama.

**Figura 10** – Perfil de raios-gama do intervalo M180–M200 do poço PINDA-02-SP, com os valores de espessura correlacionados; tons de rosa – períodos de excentricidade; tons de verde – períodos de obliquidade e tons de laranja – períodos de precessão. Em destaque, a relação entre os comprimentos de onda encontrados.

**Figura 11** – Associação das espessuras, encontradas no periodograma do intervalo M180–M200 do poço PINDA-02-SP, com as freqüências baixas, médias e altas. Observar a relação e a hierarquização entre elas.

**Figura 12** – Periodograma do intervalo M200–M260 com os valores de espessura (38,54 m, 23,93 m, 13,38 m, 9,46 m e 6,81 m) dos ciclos correlacionáveis com o perfil de raios-gama.

**Figura 13** – Perfil de raios-gama do intervalo M200–M260 com os valores de espessura correlacionados; tons de rosa – períodos de excentricidade; tons de verde – períodos de obliquidade e tons de laranja – períodos de precessão.

**Figura 14** – Associação das espessuras, encontradas no periodograma do intervalo M200–M260 do poço PINDA-02-SP, com as freqüências baixas, médias e altas. Observar a relação e a hierarquização entre elas.

**Figura 15** – Periodograma do intervalo M260 até a superfície com os valores de espessura (49,37 m; 19,03 m; 16,12 m; 10,46 m; 7,78 m e 6,32 m) dos ciclos correlacionáveis com o perfil de raios-gama.

**Figura 16** – Perfil de raios-gama do intervalo M260 até a superfície com os valores de espessura correlacionados; tons de rosa – períodos de excentricidade; tons de verde – períodos de obliquidade e tons de laranja – períodos de precessão.

**Figura 17** – Associação das espessuras encontradas no periodograma do intervalo M260 até a superfície com as freqüências baixas, médias e altas. Observar a relação e a hierarquização entre elas.

## Lista de tabelas

**Tabela 1** – Matriz de Milankovitch usada no presente trabalho, com valores em  $10^3$  anos. Montada com os valores de Berger & Loutre (1994).

**Tabela 2** – Reorganização das razões obtidas na Matriz de Milankovitch (“matriz de correlação”) usada no presente trabalho, com valores em  $10^3$  anos.

**Tabela 3** – “Matriz de espessura” contendo as espessuras encontradas no periodograma do intervalo M180–M200 do poço PINDA-02-SP.

**Tabela 4** – Reorganização das razões obtidas na “Matriz de Espessura” do intervalo M180–M200 do poço PINDA-02-SP.

**Tabela 5** – À esquerda, valores de razões obtidas na matriz de espessura do intervalo M180–M200 do poço PINDA-02-SP, que estão dentro da similaridade de 91%. E à direita, valores de Milankovitch correlacionáveis.

**Tabela 6** – Cálculo da taxa de acumulação do intervalo M180 – M200 do poço PINDA-02-SP, utilizado somente razões com similaridade igual ou superior a 91%.

**Tabela 7** – Espessuras de ciclos e períodos de Milankovitch para o intervalo M180–M200 no poço PINDA-02-SP.

**Tabela 8** – “Matriz de espessura” contendo as espessuras encontradas no periodograma do intervalo M200–M260 do poço PINDA-02-SP.

**Tabela 9** – Reorganização das razões obtidas na “matriz de espessura” do intervalo M200–M260 do poço PINDA-02-SP.

**Tabela 10** – Cálculo da taxa de acumulação do intervalo M200–M260 do poço PINDA-02-SP, utilizado somente razões com similaridade igual ou superior a 91%.

**Tabela 11** – Espessuras de ciclos e períodos de Milankovitch para o intervalo M200–M260 no poço PINDA-02-SP.

**Tabela 12** – “Matriz de espessura” contendo as espessuras encontradas no periodograma do intervalo M260 até a superfície do poço PINDA-02-SP.

**Tabela 13** – Reorganização das razões obtidas na “matriz de espessura” do intervalo M260 até a superfície do poço PINDA-02-SP.

**Tabela 14** – Espessuras de ciclos e períodos de Milankovitch para o intervalo M260 até a superfície no poço PINDA-02-SP.

## Lista de quadros

**Quadro 1** – Valores de precessão e obliquidade segundo Berger & Loutre (1994) para os últimos 440 M.a., em destaque os períodos relativos ao Oligoceno.

**Quadro 2** - Síntese das sucessões de eletrofácies descritas para a Formação Tremembé (Sampol, 2007). Em vermelho as eletrosseqüências encontradas no poço PINDA-02-SP; em azul, as correspondentes no poço PINDA-02-SP.

## Sumário

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vi
<i>Abstract</i> .....	vii
Lista de figuras .....	viii
Lista de tabelas .....	x
Lista de quadros.....	xi
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 CICLOESTRATIGRAFIA .....	3
2.1 Ciclos de Milankovitch .....	4
2.2 Análise espectral .....	6
3 GEOLOGIA REGIONAL .....	8
3.1 Bacia de Taubaté .....	8
3.2 Formação Tremembé .....	10
4 MATERIAL E MÉTODO .....	14
5 RESULTADOS .....	18
5.1 Intervalo M180–M200 .....	18
5.2 Intervalo M200–M260 .....	25
5.3 Intervalo M260 até a superfície .....	29
6 CONCLUSÕES .....	33
Referências Bibliográficas .....	34
Apêndices .....	36
Apêndice A .....	37
Apêndice B .....	38
Apêndice C .....	38

## 1 INTRODUÇÃO

É possível estabelecer uma relação entre os ciclos climáticos e seus efeitos e na sedimentação, através de análises espectrais que visam testar a existência de periodicidade deposicional em uma série temporal (Silva, 2001). Podem ser consideradas séries temporais em Geologia valores numéricos de perfis geofísicos, dados geoquímicos, valores numéricos de cores de testemunhos *etc.*; ou seja, qualquer propriedade quantificável de caráter oscilatório da sucessão sedimentar, medida em espaços ou tempos constantes, desde que se considere uma taxa de acumulação invariável (uniforme).

Os ciclos climáticos são originados pela interação dos ciclos de Milankovitch (ciclos astronômicos da Terra), que são precessão, obliquidade e excentricidade da órbita. O efeito mais marcante nos sistemas deposicionais controlados por estes ciclos é a sua simultaneidade e similaridade de transformações ambientais entre várias bacias, mesmo que distantesumas das outras, o que torna possível a correlação cicloestratigráfica entre elas (Einsele *et al*, 1991).

Em bacias de riftes intracontinentais, onde freqüentemente implantam-se sistemas lacustres, as flutuações climáticas são de fundamental importância na modelagem deposicional e, por fim, no seu estudo estratigráfico.

O **objetivo** deste trabalho é o estudo de ciclos deposicionais impostos na sedimentação das rochas da fase lacustre oligocênicas da bacia de Taubaté (Formação Tremembé), sob esse controle de mudanças climáticas induzidas por fenômenos astronômicos, com a **finalidade** de estimar o tempo mínimo de acumulação do intervalo estudado, uma vez que os efeitos da diagênese e da compactação estão sendo desconsiderados.

A **relevância** do trabalho está na contribuição para a correlação de rochas microclásticas da bacia, já que, detectando a periodicidade das sucessões estratigráficas, é

possível subdividi-la em intervalos mais detalhados que os bioestratigráficos feitos com base na palinologia (Yamamoto, 1995). Este estudo bioestratigráfico permitiu apenas o reconhecimento de biozona da Petrobrás de idade Oligoceno.

A **motivação** do presente estudo, deve-se à disponibilidade de dados geofísicos em dois furos de sondagem profundos na bacia, que cortam a Formação Tremembé, disponibilizados pelo projeto BACINT (CTPetro/FINEP) e a possibilidade de se correlacionar esta bacia com os intervalos homólogos das bacias de Santos ou Campos, na margem leste.

## 2 CICLOESTRATIGRAFIA

A Cicloestratigrafia é o estudo dos padrões deposicionais cíclicos produzidos por processos climáticos e tectônicos (Perlmutter & Matthews, 1989); mas seu papel principal é o de definir se os ciclos orbitais têm ou não capacidade de controlar a sedimentação no planeta, e se esse controle pode ser diferenciado tanto das oscilações randômicas, quanto das feições causadas pela diagênese (Einsele *et al*, 1991). Uma maneira eficiente de realizar esse tipo de observação é a aplicação de análises espectrais em dados geológicos.

Contudo, para que isso seja observado com a maior precisão possível, é necessário que o paleoambiente deposicional tenha certas características de preservação e que a taxa de acumulação tenha sido constante. Em regiões tectonicamente estáveis, sistemas lacustres e ambientes marinhos longe do retrabalhamento por ondas (baixa energia) são os melhores candidatos; já sistemas como o deltaico e o fluvial em geral não são adequados, pois o registro das mudanças climáticas não é parcialmente ou totalmente preservado em ambientes de alta energia, sujeitos a muitas descontinuidades estratigráficas.

A duração e freqüência dos eventos geológicos e a ciclicidade estratigráfica englobam, no mínimo, 16 ordens de magnitude, variando desde ciclos de curta duração, relacionados às correntes de turbidez decorrentes de cheias sazonais ( $10^6$  anos), até os ciclos relacionados à tectônica de placas envolvendo a formação ou a ruptura de supercontinentes ( $10^9$  anos) (Einsele *et al*, 1991). Não obstante, o intervalo de maior interesse geológico é conhecido como ciclos de Milankovitch, que variam entre  $10^4$  e  $10^6$  anos, de natureza orbital da Terra (astronômica).

## 2.1 Ciclos de Milankovitch

Os ciclos de Milankovitch estão relacionados às variações climáticas provocadas por variações na taxa de insolação recebida pela Terra, que varia de acordo com as alterações cíclicas dos componentes de sua órbita ao redor do Sol (Milankovitch, 1941 *apud* Schwarzacher, 2000). Esses componentes da órbita são precessão, obliquidade e excentricidade (Figura 1), que serão descritos a seguir:

Precessão, movimento do tipo peão do eixo da Terra, é causado pelo efeito de atração lunar e solar sobre a região equatorial. Esse movimento desloca as posições de equinócio e solstício em relação ao periélio (posição em que a Terra está mais próxima do Sol, durante a translação) e afélio (posição em que a Terra está mais distante do Sol, durante a translação). Possui um período absoluto de 22 ka, com períodos principais médios de cerca de 19 e 23 ka e extremos de 14 e 28 ka. O efeito da precessão está 180° fora de fase entre os hemisférios norte e sul, tendo maior importância no Equador. O impacto da precessão na insolação da Terra diminui e desaparece quando a excentricidade está próxima de zero.

Obliquidade, representa a variação do ângulo entre o eixo da Terra e o plano de translação entorno do Sol. Esse ângulo varia entre 21,5° e 24,5°, com período médio de 41 ka. Esta inclinação é o mecanismo responsável pelas variações climáticas sazonais da Terra (estações do ano), alterando a distribuição da radiação solar entre o equador e os pólos, tendo maior influência na sedimentação em latitudes altas (acima de 40°).

Excentricidade, variação da órbita de translação da Terra entorno do Sol, de mais elíptica (excentricidade de cerca de 0,06) até quase circular (cerca de 0,001), onde esses valores são calculados dividindo-se a distância focal pelo maior eixo da elipse. A periodicidade principal é de 100 ka, com componentes importantes em 95, 123 e 136 ka. Variações superpostas ocorrem em períodos de cerca de 400 ou 413 ka e 1,3 e 2 M.a..

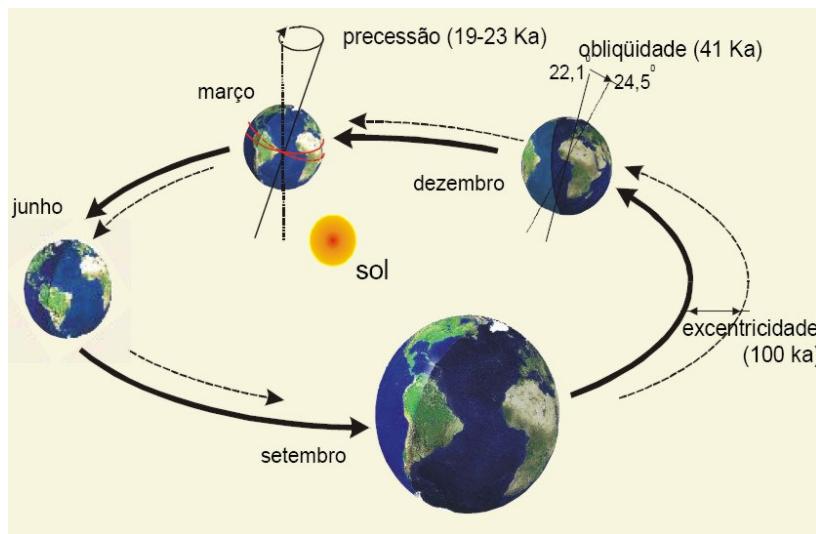


Figura 1 - Representação dos 3 ciclos orbitais principais definidos por Milankovitch (Imbrie & Imbrie, 1979 *apud* Freitas, 2006), os quais controlam as variações climáticas históricas entre  $10^4$  e  $10^6$  anos.

No passado os períodos de precessão e obliquidade eram menores em função da maior aceleração do movimento de rotação da Terra (Freitas, 2006). Para a idade de sedimentação da Formação Tremembé (Oligoceno), os valores de precessão (longa e curta) e obliquidade (longa e curta) são, respectivamente, 22,5 ka, 18,6 ka e 51,2 ka, 39,4 ka, como mostra o Quadro 1 (Berger & Loutre, 1994 *apud* Silva, 2001).

As variações climáticas interferem diretamente na variação do nível do mar devido à variação do volume das geleiras em grandes latitudes; variações no nível dos lagos devido a variações regionais no balanço hídrico (evaporação/precipitação); mudanças nas taxas de produção, tamanho dos grãos, mineralogia, intemperismo; mudanças nos ambientes deposicionais, devido à alteração do clima na bacia receptora dos sedimentos. São destas formas que os ciclos de Milankovitch controlam o espaço de acomodação/acumulação e a disponibilidade de sedimentos (fonte sedimentar) e, assim, modelam os sistemas deposicionais.

Quadro 1 – Valores de precessão e obliquidade segundo Berger & Loutre (1994) para os últimos 440 M.a., em destaque os períodos relativos ao Oligoceno.

<b>GEOCRONOMETRIA (M.a.)</b>	<b>PERÍODOS DE PRECESSÃO (10<sup>3</sup> anos)</b>		<b>PERÍODOS DE OBLIQÜIDADE (10<sup>3</sup> anos)</b>	
	19,0	23,0	41,0	54,0
72	18,6	22,5	39,4	51,2
270	17,6	21,0	35,2	44,3
298	17,4	20,7	34,3	42,9
380	16,8	19,9	32,1	39,4
440	16,4	19,3	30,5	37,2

## 2.2 Análise espectral

A análise espectral utiliza métodos estatísticos a fim de determinar a existência de periodicidade em um sinal ondulatório qualquer. Quando ciclos no registro sedimentar são analisados utilizando esse método, o principal a ser observado são seus harmônicos ou componentes de ciclo.

O método mais difundido sobre esse tipo de análise é a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que é uma técnica que possibilita avaliar a Transformada Discreta de Fourier (DFT) mais rapidamente, ou seja, transforma um gráfico que contenha informações estratigráficas de espessura *versus* quaisquer características geológicas (já mencionadas anteriormente) em um gráfico de amplitude *versus* período ou freqüência, chamado periodograma, necessitando de apenas  $N \log_2 N$  operações, quando a DFT requer  $N^2$  operações complexas, poupando assim, muito tempo de processamento de dados, onde N é o número de amostras. A DFT faz a decomposição do sinal complexo em um somatório de funções senoidais com comprimento de onda e amplitude individuais. E é muito utilizada para processamento digital de sinais estimando um espectro de um processo estacionário, através do cálculo:

$$x_k = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} f_j e^{\frac{2\pi i}{n} jk} \quad k = 0, \dots, n-1$$

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n} jk} \quad j = 0, \dots, n-1$$

Onde,  $x_k$  possui valores discretos e  $f_j$  é uma seqüência com  $n$  amostras consecutivas.

Os picos do periodograma expressam a importância do comprimento de onda (freqüência) no sinal complexo; quanto mais significativa é a freqüência, maior será seu pico no gráfico. Este fato facilita a visualização dos ciclos, já que quanto mais espessuras semelhantes se repetirem ao longo do sinal, mais marcado será o pico correspondente.

Nesse trabalho foi considerada uma taxa de acumulação constante para o intervalo de rochas microclásticas lacustres da Formação Tremembé atravessado pela sondagem utilizada para este estudo. Logo, consideram-se os dados como uma série temporal livre de tendências, ou seja, uma série estacionária, apropriada para a aplicação da FFT.

### 3 GEOLOGIA REGIONAL

#### 3.1 Bacia de Taubaté

A bacia de Taubaté localiza-se na porção Leste do estado de São Paulo, próxima às fronteiras dos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais (Figura 2). Sua largura varia entre 10 e 25 km; comprimento aproximado de 170 km alongados na direção SW-NE e profundidade máxima de 840 km (Marques, 1990). É uma bacia do tipo rifte intracontinental, com estruturação interna caracterizada por grábens assimétricos, limitados por falhas e juntamente com as bacias de Resende, São Paulo e Volta Redonda forma o Rifte Continental do Sudeste Brasileiro (RCSB) (Riccomini, 1989). O embasamento desse rifte é composto por rochas metamórficas de baixo, médio e alto grau (fácies anfibolito) e granitóides sin- e tarditectônicos, do Cinturão de Dobramentos Ribeira.

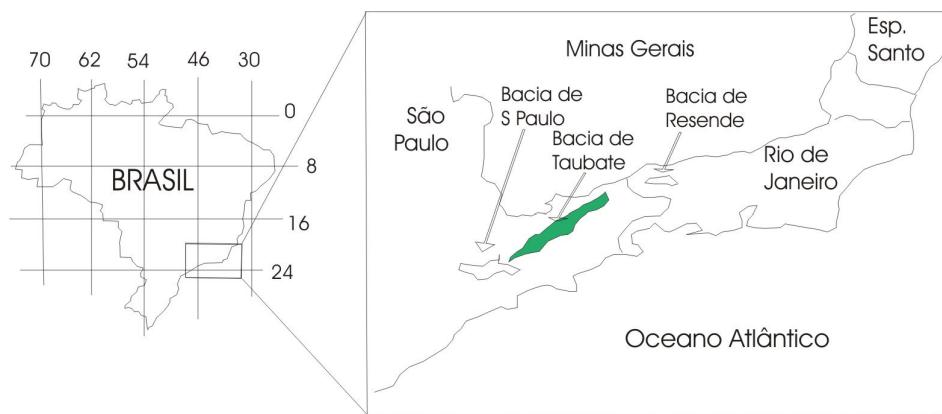


Figura 2 - Mapa de localização das bacias do RCSB, com destaque para bacia de Taubaté (Fernandes, 1993).

A formação desta bacia está relacionada ao processo tafrogênico que resultou na abertura do Oceano Atlântico, cujo processo possibilitou uma sedimentação cenozóica tipicamente continental, que pode ser dividida, segundo Riccomimi (1989), em duas etapas: (i) a primeira, sintectônica à fase distensiva, e envolve a deposição dos sedimentos do Grupo Taubaté; e, a segunda, (ii) posterior à tectônica, a deposição da Formação Pindamonhangaba e de sedimentos aluviais e coluviais que recobrem a bacia.

Molinari (2003), a partir de Marques (1990) e Fernandes (1993), identificou quatro diferentes depocentros denominando-os, de NE para SW, como sub-bacias de Lorena, Aparecida, Quiririm, São José dos Campos, limitadas pelos altos estruturais de Guaratinguetá, Pindamonhangaba e Caçapava, respectivamente (Figura 3). Essa estruturação interna é caracterizada por grábens assimétricos limitados por falhas, formando sub-bacias com basculamentos invertidos ora para SE ora para NW. Os altos estruturais que limitam os semi grábens são interpretados como zonas de transferência ou de acomodação (Vidal *et al.*, 2004). O poço estudado no presente trabalho encontra-se na sub-bacia de Aparecida (Figura 3), atingiu na profundidade 689,4 m o contato das rochas sedimentares da Formação Resende com embasamento da bacia, onde o embasamento mergulha para NW e a espessura sedimentar chega até 850m (Marques, 1990 *apud* Molinari, 2003).

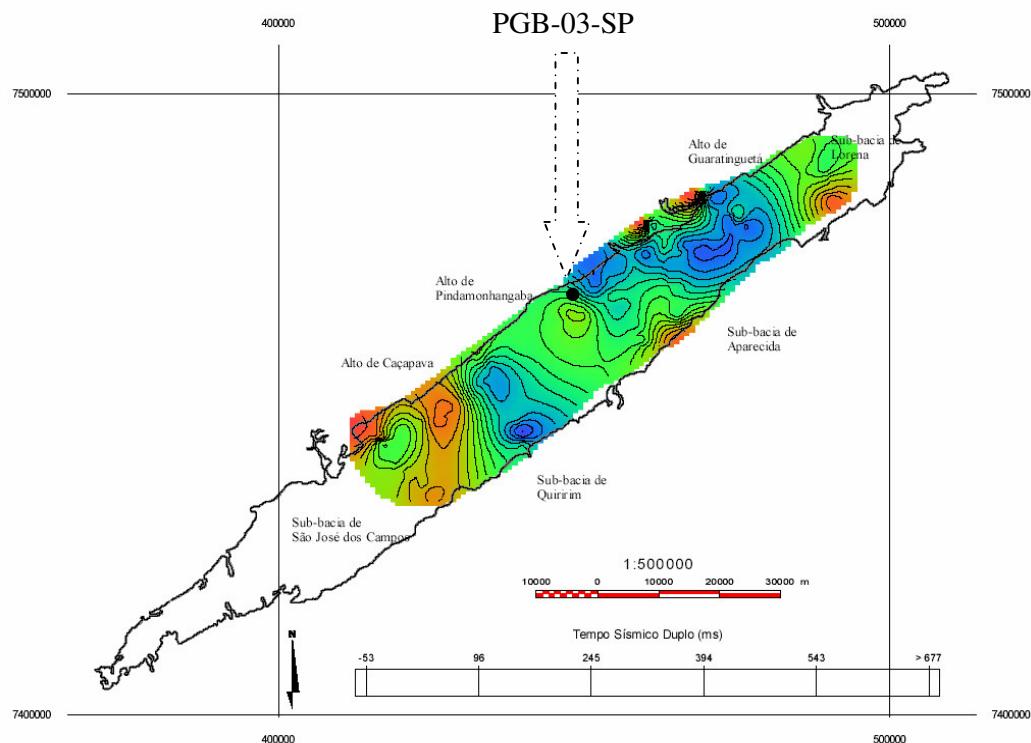


Figura 3 – Mapa de contorno estrutural do embasamento sísmico da bacia de Taubaté (Molinari, 2003), onde cores avermelhadas indicam altos e azuladas depressões, com indicação aproximada do poço PGB-03-SP.

### 3.2 Formação Tremembé

A Formação Tremembé foi formalizada por Almeida (1958 *apud* Torres-Ribeiro, 2004), que estabeleceu como área-tipo a região ao redor das cidades de Taubaté e Tremembé (SP). Possui geometria tabular, com espessura máxima conhecida de cerca de 400 m e, geograficamente, está restrita às sub-bacias de Lorena, Aparecida, Quiririm e São José dos Campos, cuja distribuição foi verificada em linhas sísmicas de reflexão (Molinari, 2003). Aparece interdigitando-se lateral e verticalmente com os depósitos da Formação Resende e seu limite superior é discordante erosivo com as formações Resende e São Paulo.

Yamamoto (1995) datou a formação como oligocênica, através de estudo palinológico (Figura 4).

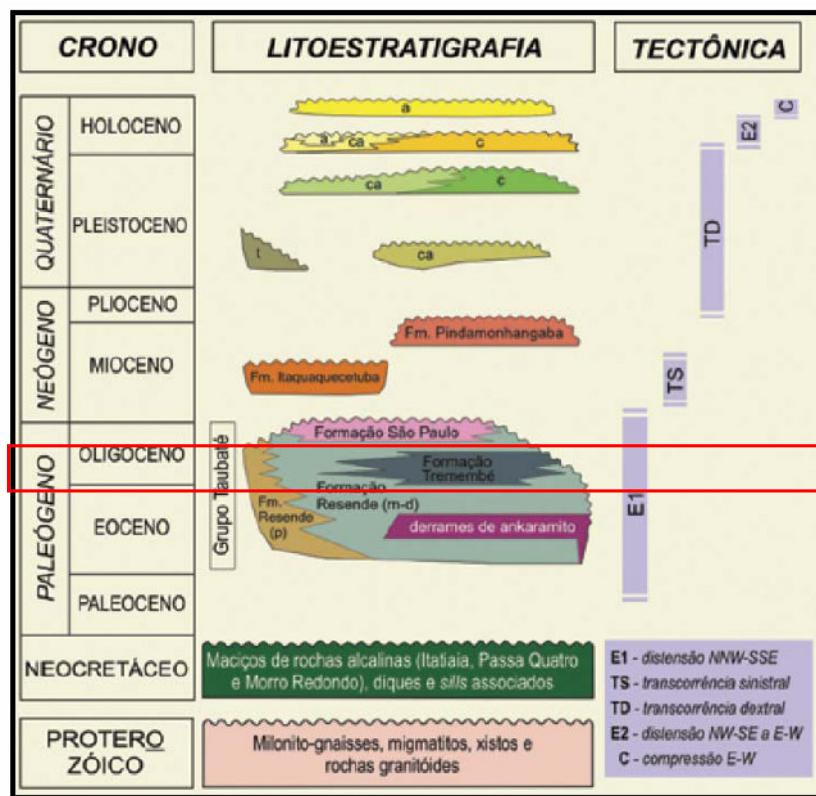


Figura 4 - Diagrama estratigráfico e evolução tectono-sedimentar proposto por Riccomini (1989) para o segmento central do RCSB, com destaque para a Formação Tremembé.

De forma geral, a Formação Tremembé é constituída por argilitos verdes maciços, folhelhos papiráceos, ritmitos (intercalação de marga/calcário e folhelho), arenitos e

calcários. Alguns níveis de folhelhos apresentam elevado teor de carbono orgânico total (COT) e a grande parte da matéria orgânica é do tipo I, correspondendo assim, a um excelente potencial gerador de hidrocarbonetos, muito embora sejam imaturos, não tendo entrado na janela de geração (Freitas, 2007). Apresenta rico conteúdo de macrofósseis, existindo referências a restos de folhas e troncos de angiospermas, espículas de esponjas, aves, répteis e mamíferos, entre outros (Torres Ribeiro & Borghi, 2005).

Um dos primeiros trabalhos que interpretaram a Formação Tremembé como um sistema lacustre foi de Almeida (1955 *apud* Torres-Ribeiro 2004), sendo esta interpretação acompanhada por todos os autores que se seguiram.

Riccomini *et al* (1996), com emprego da difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura no estudo dos argilominerais contidos nos sedimentos lacustres da Formação Tremembé, identificou argilominerais pertencentes aos grupos da esmectita e da caulinita, e, subordinadamente, da mica e clorita. Sampol (2007) atribui a esse fator a razão para valores relativamente baixos de raios-gama aos finos da formação.

Os argilominerais detriticos dos sedimentos das formações Tremembé são representados principalmente pelas esmectitas de bordos arqueados, sendo sua presença indicativa das condições paleoclimáticas com tendência à aridez, vigentes durante a época de sua geração. Halloysitas eodiagenéticas, presentes nos arenitos deltaicos da Formação Tremembé, proviriam da decomposição de feldspatos e seriam indicativas de sazonalidade pluviométrica vigente à época da sedimentação (Riccomini *et al*, 1996). De modo geral, as variações paleoclimáticas e paleoambientais indicadas pelos argilominerais dos sedimentos paleogênicos estudados mostram condições paleoambientais similares à tendência global.

Sant'Anna (1999), na Figura 5, interpreta a Formação Tremembé como o registro lacustre tipo *playa-lake*, desenvolvido na porção central da bacia de Taubaté, e de forma mais restrita na bacia de São Paulo. Contudo, segundo Sanson (2004), há indícios dessa ocorrência

também na porção leste da bacia de Resende, como indicam amostras de calha de argilitos maciços em poços para água.

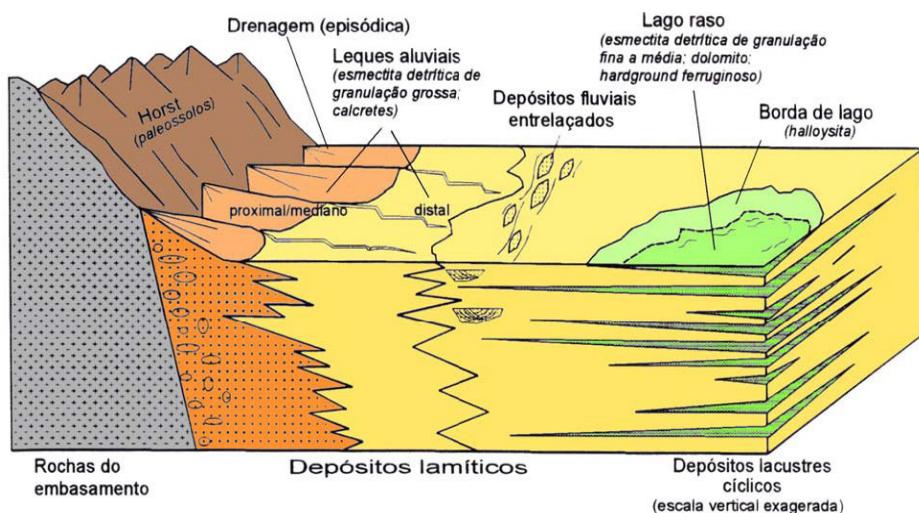


Figura 5 – Modelo deposicional proposto por Sant'Anna (1999), caracterizado por leques aluviais, rio entrelaçado e lagos rasos e restritos.

Segundo Torres-Ribeiro (2004), a Formação Tremembé não deve ser compreendida como um sistema deposicional do tipo *playa lake*, pois a gênese das camadas de carbonato de cálcio presentes não está associada a eventos de hirpersalinidade lacustre, e sim à dinâmica do solo em climas semi-áridos. Este autor acrescenta que não se identifica a relação lateral leques aluviais proximais, leques aluviais distais, rio fluvial entrelaçado e lago, mas leques aluviais desenvolvendo-se diretamente no lago ou fluxos gravitacionais distais. Classifica por fim, o paleolago Tremembé como fechado, oligomítico e eutrófico (Figura 6). Contudo, segundo Sampol (2007) a Formação Tremembé não é, em termos estratigráficos, um único cenário lacustre.

Riccomini (1993 *apud* Freitas, 2007) reconheceu controle astronômico nos folhelhos papiráceos da Formação, estimando então, um tempo de deposição de 650 ka para o pacote rochoso da Formação Tremembé.

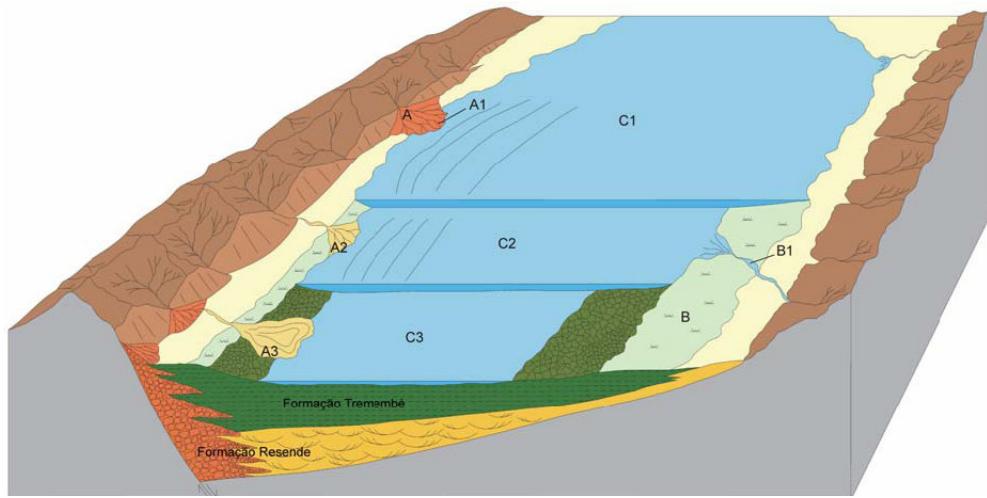


Figura 6 – Modelo deposicional proposto por Torres-Ribeiro (2004) para a Formação Tremembé: A) leques aluviais da Formação Resende, com fan-deltas (A1) e lobos deltaicos distais (A2); B) planície lamosa/paludal com canais rasos (B1) e C) lago, com nível d'água variável, ora recobrindo a planície lamosa ora expondo o substrato, desenvolvendo gretas de contração. Eventuais fluxos gravitacionais distais recobriam essa planície exposta.

#### **4 MATERIAL E MÉTODO**

Para a realização deste estudo foi feita uma análise espectral do perfil de raios-gama do poço PINDA-02-SP (PGB-03-SP) que apresentou valores mínimo de 69,9 e máximo de 438,3 (medido em graus API, com intervalo de 10 cm). O poço localiza-se na borda norte da bacia, próximo à Cidade de Pindamonhangaba (SP) (Figura 3), foi perfurado em agosto de 2003 pelo Projeto BACINT (CTPetro/FINEP) e atingiu na profundidade 689,4m o contato das rochas sedimentares da Formação Resende com embasamento da bacia.

O método de análise estatística adotado foi semelhante ao descrito por Azambuja Filho (1994) e por Silva (2001), dividindo-se, então, o trabalho em duas etapas: (1) seleção e subdivisão do intervalo de interesse e (2) análise espectral.

Para a realização da primeira etapa, foi utilizado como base o trabalho de Sampol (2007), que determinou sete marcos elétricos (M140 a M260) para subdividir e correlacionar a Formação Tremembé em dois poços na bacia, um dos quais aqui sob estudo (Figura 7 e Quadro 2).

Dentre os intervalos estabelecidos por esses marcos, foram escolhidos, de acordo com o paleoambiente, os de M180–M200, M200–M260 e de M260 até a superfície. O intervalo basal da Formação Tremembé, entre os marcos M120 e M180, não foi utilizado, uma vez que a curva de raios-gama é indicativa de granulometria mais grossas, associadas a depósitos deltaicos e fluviais, além da falta de dados na porção média do intervalo.

Os intervalos M180–M200 e M220–M260 correspondem à sucessão de eletrofácies SF4 no poço utilizado (PINDA-02-SP), que foi interpretada, por Sampol (2007), como um paleoambiente deposicional fluvial. Apesar de não ser aconselhável a análise cicloestratigrafia neste tipo de registro, potencialmente atravessado por descontinuidades estratigráficas, ela foi testada, pois essa sucessão de eletrofácies foi correlacionada, pela

autora com as sucessões de eletrofácies SF2 e SF3, encontradas no poço PINDA-02-SP (Figura 7), que indicam um paleoambiente lacustre, mais adequado.

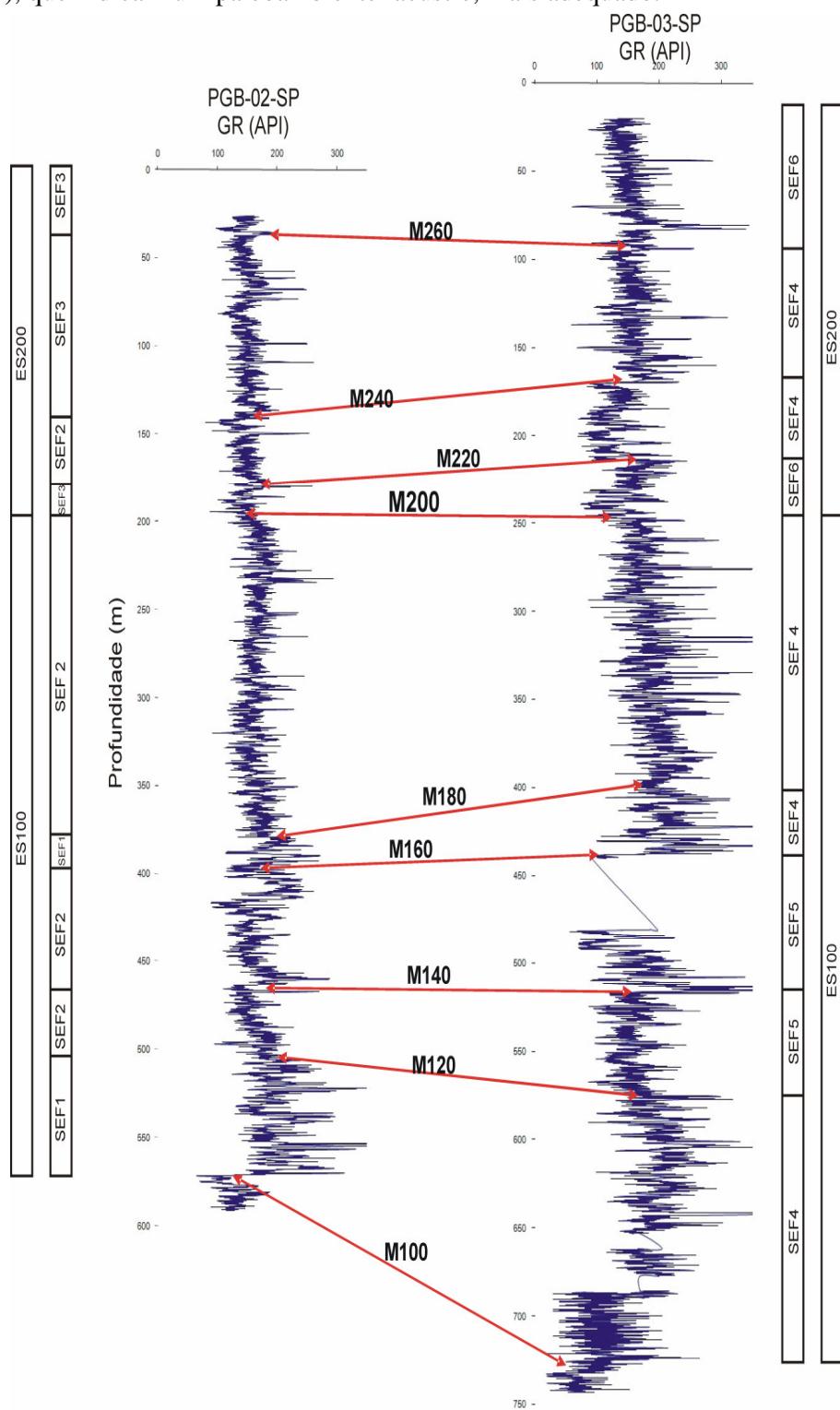


Figura 7 - Correlação dos perfis de raios-gama dos poços, feita por Sampol (2007), onde são observados os marcos elétricos (M100—M260), as sucessões de eletrofácies (SEF1—SEF6) e as eletrosseqüências (ES100 e ES200). Em destaque o marco M120 (início da sedimentação da Formação Tremembé). O intervalo de estudo é aquele entre o M180 até a superfície.

Quadro 2 - Síntese das sucessões de eletrofácies descritas para a Formação Tremembé (Sampol, 2007). Em vermelho as eletrossequências encontradas no poço PINDA-02-SP; em azul, as correspondentes no poço PINDA-02-SP.

CÓDIGO	DIAGNOSE	INTERPRETAÇÃO
<b>SEF1</b>	Sucessão de eletrofácies EA-EVm-EVc-EL	Fluvial
<b>SEF2</b>	Sucessão de eletrofácies EVm-EVc-EA-EL	Flúvio-deltaico / Deltaicolacustre
<b>SEF3</b>	Sucessão de eletrofácies EVm-EVc-EA	Lacustre
<b>SEF4</b>	Sucessão de eletrofácies EA-EVc-EVm-EL	Fluvial
<b>SEF5</b>	Sucessão de eletrofácies EA-EVm-Evc	Flúvio-deltaico
<b>SEF6</b>	Sucessão de eletrofácies EVm-EA-EVc-EL	Lacustre

A segunda etapa constituiu na análise espectral (Figura 8), para a qual foi utilizado o programa *MatLab®*, versão 6.5, para o processamento pela Transformada Rápida de Fourier e a construção do periodograma, e assim determinar as freqüências de maior importância que compõem o sinal. Um periodograma é um gráfico utilizado para demonstrar a importância de cada freqüência em um sinal complexo, no estudo de ciclos ele é útil porque através dele pode-se destacar as espessuras dos ciclos mais importantes que compõem o dado sinal.

Durante os cálculos para a confecção dos periodogramas no programa *MatLab®* foi importante levar em consideração a freqüência Nyquist, que é a freqüência máxima em que se podem obter com confiança a partir de uma série de dados, a qual é definida por  $f_n = 1/2\Delta t$ , onde  $f_n$  é a freqüência Nyquist e  $\Delta t$  é o intervalo de amostragem. No caso estudado,  $f_n$  é igual a 0,05, já que a amostragem do raios-gama foi feita com espaçamento de 10 cm.

Após o processamento pela Transformada Rápida de Fourier e a confecção dos periodogramas, as espessuras dos ciclos mais representativas foram correlacionadas com os

ciclos de Milankovitch através do método de correlação de matrizes, que será explicado durante a apresentação dos resultados no item 5.

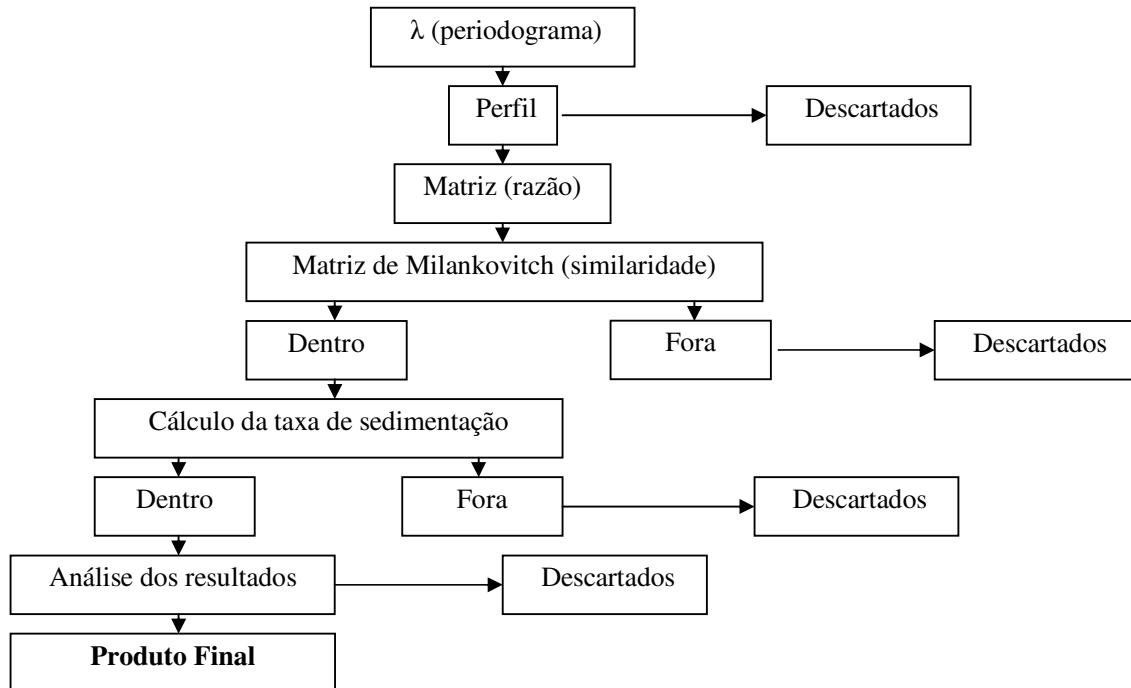


Figura 8 – Fluxograma esquemático para análise espectral de uma série temporal.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Intervalo M180–M200

As principais espessuras dos ciclos (Anexo 1) calculadas a partir do periodograma da Figura 9, obtidas com os dados de raios-gama do intervalo M180–M200 do poço PINDA-02-SP são: 25,47 m; 14,76 m; 11,70 m; 8,77 m; 7,90 m e 5,03 m. Essas espessuras são calculadas através da razão  $\Delta t/F$ , onde  $\Delta t$  é o intervalo de amostragem (10cm no presente estudo) e F é a freqüência correspondente ao pico. Um grupo de valores de freqüências (picos do periodograma) pode indicar o mesmo fenômeno cíclico, já que a taxa de sedimentação pode variar. Essa variação é menor em períodos longos; então, as menores freqüências aparecerão no periodograma com grupos de picos mais concentrados e destacados e as freqüências maiores, em grupos mais dispersos pelo gráfico.

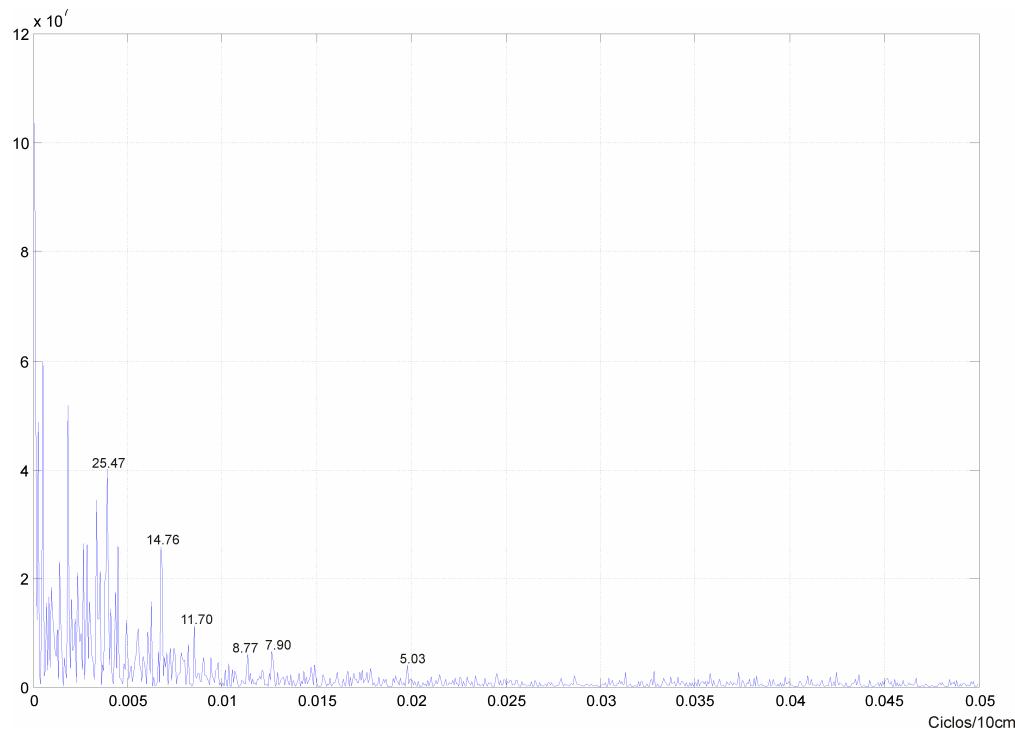


Figura 9 – Periodograma do intervalo M180 – M200 com os valores de espessura (25,47 m; 14,76 m; 11,70 m; 8,77 m; 7,90 m e 5,03 m) dos ciclos correlacionáveis com o perfil de raios-gama.

Os valores de espessura dos ciclos obtidos a partir do periodograma foram submetidos a uma primeira análise visual sobre o perfil de raios-gama, buscando-se compartmentá-lo coerentemente com as freqüências baixas, médias e altas. Essa análise é importante para provar a coerência e a relação entre as mesmas, já que fenômenos orbitais possuem uma conexão mútua, ou seja, uma espessura associada ao período de precessão curta deve conter 2 ou 3 períodos de obliquidade, por exemplo, e essa característica fica marcada no perfil de raios-gama. O resultado dessa análise encontra-se na Figura 10, que mostra os períodos de excentricidade em tons de rosa; períodos de obliquidade em tons de verde; e períodos de precessão em tons de laranja. Observa-se que os comprimentos de ciclo por volta de 25 m podem ser correlacionados com 2 ou mais comprimentos de ciclo de 11 m e 14 m em média, e dentro desses comprimentos de 11 m e 14 m podem ser encontrados comprimentos de onda de, em média 5 m, 7 m e 8 m, como destacado na Figura 10. Esses valores são médios e aproximados, pois como já foi discutido, as espessuras dos ciclos podem variar com a mudança da taxa de acumulação.

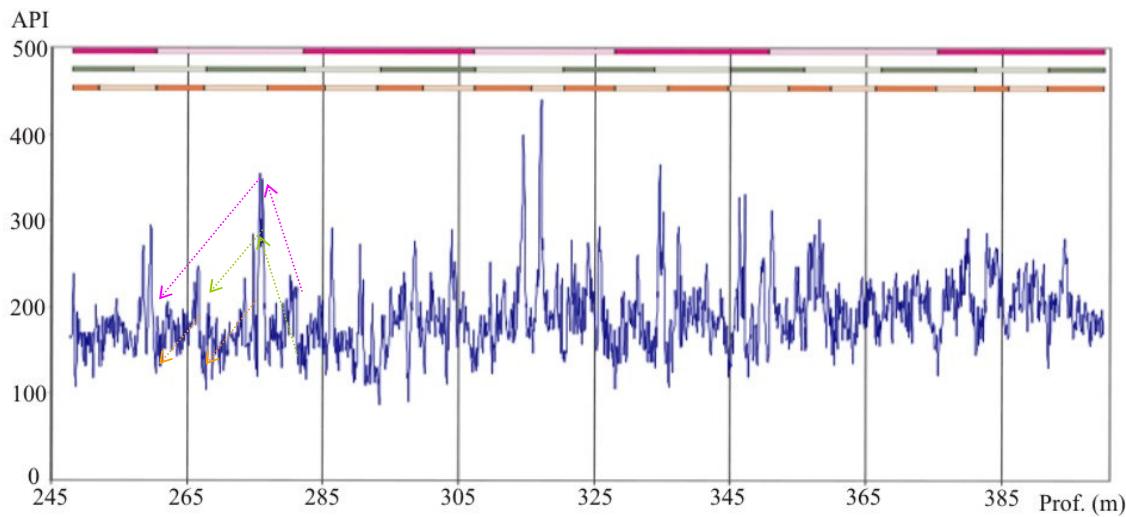


Figura 10 – Perfil de raios-gama do intervalo M180 – M200 do poço PINDA-02-SP, com os valores de espessura correlacionados; tons de rosa – períodos de excentricidade; tons de verde – períodos de obliquidade e tons de laranja – períodos de precessão. Em destaque, a relação entre os comprimentos de onda encontrados.

Com isso, foi possível relacionar as espessuras dos ciclos, calculadas a partir do periodograma da Figura 9, com o perfil de raios-gama da Figura 10, compartimentando-o em ciclos de engrossamento e sucessivo afinamento da base para o topo. Essa compartimentação, como já foi dito, facilita a observação das relações entre as altas, médias e baixas freqüências, destacadas a seguir:

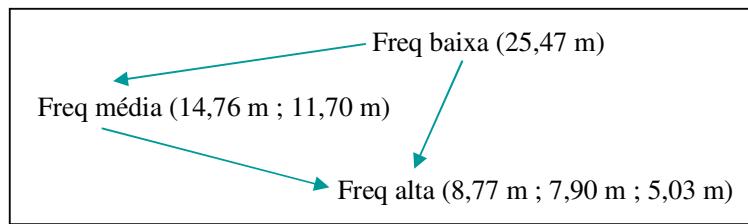


Figura 11 – Associação das espessuras, encontradas no periodograma do intervalo M180 – M200 do poço PINDA-02-SP, com as freqüências baixas, médias e altas. Observar a relação e a hierarquização entre elas.

O passo seguinte foi a correlação de matrizes, realizada semelhantemente ao método descrito por Azambuja Filho (1994). A correlação foi feita entre uma matriz de tempo teórica (matriz de Milankovitch – tabelas 1 e 2), montada com os valores de excentricidade, obliquidade e precessão para o Oligoceno (Quadro 1), e a matriz de espessura (tabelas 3 e 4), montada com as espessuras do periodograma que foram encontradas no perfil de raios-gama. Tal correlação consiste em comparar as razões pela divisão simples dos valores encontrados nas matrizes. Se o resultado estiver dentro da margem de similaridade, que no presente estudo é de 91%, os dados são guardados; caso contrário, são descartados.

Tabela 1 – Matriz de Milankovitch usada no presente trabalho, com valores em  $10^3$  anos. Montada com os valores de Berger & Loutre (1994).

	<b>100</b>	<b>51,2</b>	<b>39,4</b>	<b>22,5</b>	<b>18,6</b>
<b>100</b>	1	1,95	2,54	4,44	5,38
<b>51,2</b>		1	1,30	2,28	2,75
<b>39,4</b>			1	1,75	2,12
<b>22,5</b>				1	1,21
<b>18,6</b>					1

Tabela 2 – Reorganização das razões obtidas na Matriz de Milankovitch (“matriz de correlação”) usada no presente trabalho, com valores em  $10^3$  anos.

<b>“Matriz de correlação” (<math>10^3</math>)</b>		
<b>Razão</b>	<b>Período Longo</b>	<b>Período Curto</b>
5,38	100	18,6
4,44	100	22,5
2,75	51,2	18,6
2,54	100	39,4
2,28	51,2	22,5
2,12	39,4	18,6
1,95	100	51,2
1,75	39,4	22,5
1,30	51,2	39,4
1,21	22,5	18,6

Tabela 3 – “Matriz de espessura” contendo as espessuras encontradas no periodograma do intervalo M180 – M200 do poço PINDA-02-SP.

	<b>25,47</b>	<b>14,76</b>	<b>11,7</b>	<b>8,77</b>	<b>7,9</b>	<b>5,03</b>
<b>25,47</b>	1	1,73	2,18	2,90	3,22	5,06
<b>14,76</b>		1	1,26	1,68	1,87	2,93
<b>11,7</b>			1	1,33	1,48	2,33
<b>8,77</b>				1	1,11	1,74
<b>7,9</b>					1	1,57
<b>5,03</b>						1

Tabela 4 – Reorganização das razões obtidas na “Matriz de Espessura” do intervalo M180 – M200 do poço PINDA-02-SP.

“Matriz de espessura” (m)		
Razão	Período Longo	Período Curto
5,06	25,47	5,03
3,22	25,47	7,9
2,93	14,76	5,03
2,90	25,47	8,77
2,33	11,7	5,03
2,18	25,47	11,7
1,87	14,76	7,9
1,74	8,77	5,03
1,73	25,47	14,76
1,68	14,76	8,77
1,57	7,9	5,03
1,48	11,7	7,9
1,33	11,7	8,77
1,26	14,76	11,7
1,11	8,77	7,9

Os valores que foram guardados, ou seja, que estavam dentro da similaridade desejada, foram organizados na Tabela 5. Por exemplo, as espessuras de 25,47 m e 5,03 m possuem razão de 5,06 (Tabela 5, à esquerda), e são correlacionáveis com os períodos de Milankovitch de  $100 \cdot 10^3$  e  $18,6 \cdot 10^3$  anos, respectivamente, que possuem razão 5,38 (Tabela 5, à direita). A similaridade entre essas razões de 94%, foi calculada através da divisão entre as razões 5,06 e 5,38. Com isso em mente, procurou-se organizar os pares espessura–tempo na Tabela 6, e assim calcular a taxa de acumulação através de uma simples divisão entre os pares. Um par é formado pela espessura e pelo tempo de razões com similaridade igual ou superior à 91%, ambos do período longo ou ambos do período curto.

Após o cálculo da taxa de acumulação, uma espessura de ciclo, encontrada no periodograma, só é relacionada a um período de Milankovitch ao passar por duas análises. A primeira análise para a validação desses pares espessura–tempo é estar dentro da margem de

taxa de acumulação (valores marcados em cinza e amarelo da Tabela 6), que, neste trabalho, foi adotada segundo uma combinação de dois autores. Enos (1991 *apud* Santos, 2005) diz que a taxa de acumulação em um ambiente lacustre varia entre 22,5 cm/ka e 180 cm/ka e Schwab (1976, *apud* Santos, 2005), que a taxa de acumulação em uma bacia de rifte não passa de 50 cm/ka. Então, respeitando ambas as condições, a taxa de acumulação foi fixada entre 22,5 cm/ka até 50 cm/ka.

A segunda etapa da validação consistiu em confrontar os pares de espessura–tempo que estavam dentro da margem de taxa de acumulação com a primeira análise visual feita entre as espessuras do periodograma e o perfil de raios-gama, que se encontra na Figura 11. Os pares só são admitidos como corretos caso tenham sido correlacionados com as espessuras encontradas no perfil; caso contrário, são desprezados. Pode-se observar na Tabela 6, que existem pares de espessura–tempo que possuem valores coerentes de taxa de acumulação; porém vão de encontro com a análise visual feita anteriormente. Como exemplo, o comprimento de ciclo 25,47 m (marcado em amarelo) foi correlacionado nesta etapa do trabalho com os períodos de Milankovitch de  $51,20 \cdot 10^3$  anos e  $100 \cdot 10^3$  anos; porém, na análise visual a correlação foi verificada com períodos de baixa freqüência, ou seja, períodos de  $100 \cdot 10^3$  anos, este período tomado como correto.

É importante observar também quantas vezes um mesmo par é correlacionado entre si. Como exemplo, o comprimento de ciclo 8,77 m, foi correlacionado uma vez com o período de  $18,60 \cdot 10^3$  anos e duas vezes com o período de  $22,60 \cdot 10^3$  anos (Tabela 6). Em ambos os casos, a taxa de acumulação encontra-se dentro da faixa entre 22,5 cm/ka e 50 cm/ka e a análise visual foi satisfeita; porém, foi tomado como correto o período de  $22,50 \cdot 10^3$ , já que este par espessura–tempo foi correlacionado mais vezes.

Tabela 5 – À esquerda, valores de razões obtidas na matriz de espessura do intervalo M180 – M200 do poço PINDA-02-SP, que estão dentro da similaridade de 91%. E à direita, valores de Milankovitch correlacionáveis.

“Matriz de espessura” (m)			“Matriz de correlação” ( $10^3$ )		
Razão	Período Longo	Período Curto	Razão	Período Longo	Período Curto
5,06	25,47	5,03	5,38	100	18,6
2,93	14,76	5,03	2,75	51,2	18,6
2,90	25,47	8,77	2,75	51,2	18,6
2,33	11,7	5,03	2,28	51,2	22,5
2,18	25,47	11,7	2,12	39,4	18,6
1,87	14,76	7,9	1,95	100	51,2
1,74	8,77	5,03	1,75	39,4	22,5
1,73	25,47	14,76	1,75	39,4	22,5
1,68	14,76	8,77	1,75	39,4	22,5
1,33	11,7	8,77	1,30	51,2	39,4
1,26	14,76	11,7	1,30	51,2	39,4
1,11	8,77	7,9	1,21	22,5	18,6

Tabela 6 – Cálculo da taxa de acumulação do intervalo M180 – M200 do poço PINDA-02-SP, utilizado somente razões com similaridade igual ou superior a 91%.

Período longo			Período curto		
Espessura	correlação	m/ka	Espessura	correlação	m/ka
25,47	100,00	0,25	5,03	18,60	0,27
14,76	51,20	0,29	5,03	18,60	0,27
25,47	51,20	0,50	8,77	18,60	0,47
11,70	51,20	0,23	5,03	22,50	0,22
25,47	39,40	0,65	11,70	18,60	0,63
14,76	100,00	0,15	7,90	51,20	0,15
8,77	39,40	0,22	5,03	22,50	0,22
25,47	39,40	0,65	14,76	22,50	0,66
14,76	39,40	0,37	8,77	22,50	0,39
11,70	51,20	0,23	8,77	39,40	0,22
14,76	51,20	0,29	11,70	39,40	0,30
8,77	22,50	0,39	7,90	18,60	0,42

Dentre os valores encontrados na correlação os tomados com corretos, de acordo com o método descrito acima, estão destacados em cinza na Tabela 6 e organizados a seguir:

Tabela 7 – Espessuras de ciclos e períodos de Milankovitch para o intervalo M180-M200 no poço PINDA-02-SP.

Espessura (metros)	Correlação ( $10^3$ )	Taxa de acumulação (m/ka)
25,47	100	0,25
14,76	51,20	0,29
11,70	51,20	0,23
8,77	22,50	0,39
7,90	18,60	0,42
5,03	18,60	0,27

Ambos os valores de espessura 14,76 m e 11,70 m podem ser atribuídos aos períodos de obliquidade longa e curta, como mostra a Tabela 6, já que a taxa de acumulação e a análise visual são coerentes. Porém, foram correlacionados com os períodos de obliquidade longa e curta, respectivamente, já que aparecem assim correlacionados mais vezes, tornando o resultado mais confiável.

Foi encontrado para esse intervalo uma taxa média de acumulação de 0,29 m/ka (calculada através da média harmônica das taxas) e 6 períodos de excentricidade curta, o que mostra um tempo mínimo de acumulação de  $600 \cdot 10^3$  anos. O tempo é considerado como mínimo já que durante a metodologia não foi levado em consideração os efeitos de compactação, períodos de não deposição e erosão.

## 5.2 Intervalo M200–M260

Neste intervalo, as principais espessuras de ciclos (Anexo 2) encontradas a partir do periodograma da Figura 12, obtido com os dados do intervalo M200–M260 do poço PINDA-02-SP, são: 38,54 m; 23,93 m; 13,38 m; 9,46 m e 6,81 m. Essas espessuras foram submetidas a uma primeira análise visual, sendo correlacionadas com o perfil de raios-gama (Figura 13). Análise que possibilitou a compartimentação do perfil de raios-gama em quatro intervalos bem marcados de baixa freqüência, evidenciados pela quebra brusca da curva. Observar na Figura 13 que os ciclos de comprimento 23,93 m não estão bem marcados no perfil de raios-

gama, apenas aparecem ciclos de comprimentos de em média 18 m e 20 m (tons de verde). Contudo, esse ciclo será levado em consideração e assim, analisado, já que esses comprimentos de 18 me 20 m podem ser variações do ciclo de 23,93, em função da variação da taxa de acumulação.

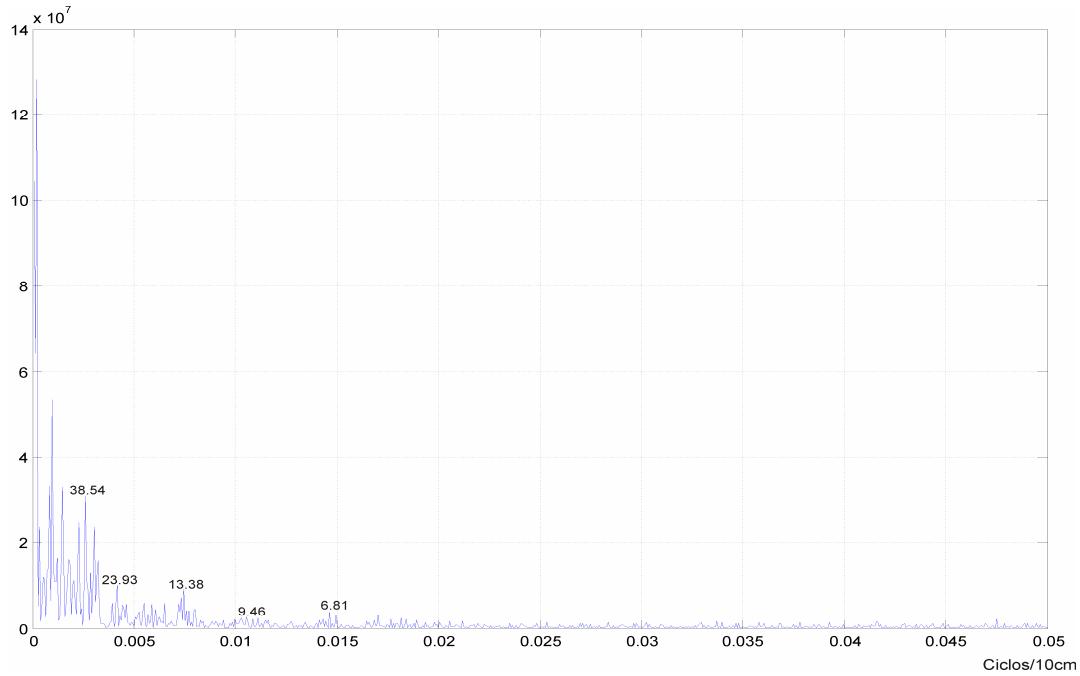


Figura 12 – Periodograma do intervalo M200–M260 com os valores de espessura (38,54 m, 23,93 m, 13,38 m, 9,46 m e 6,81 m) dos ciclos correlacionáveis com o perfil de raios-gama.

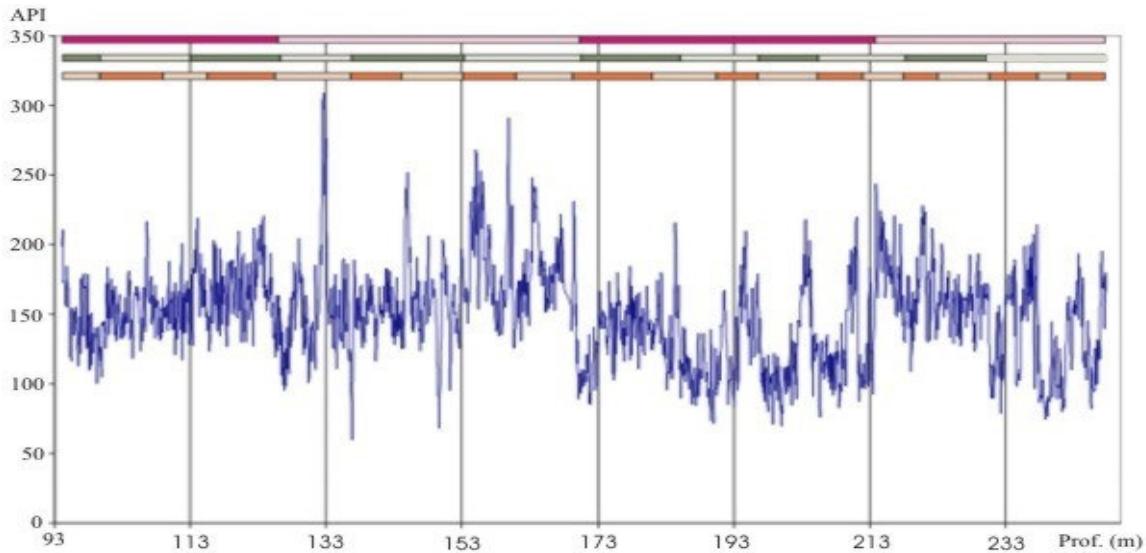


Figura 13 – Perfil de raios-gama do intervalo M200–M260 com os valores de espessura correlacionados; tons de rosa – períodos de excentricidade; tons de verde – períodos de obliquíüdade e tons de laranja – períodos de precessão.

Foi adotada a mesma sistemática utilizada no intervalo anterior determinando a relação entre as espessuras do periodograma da Figura 12 com o perfil de raios-gama da Figura 13 e essa relação entre as freqüências baixas, médias e altas encontra-se na Figura 14.

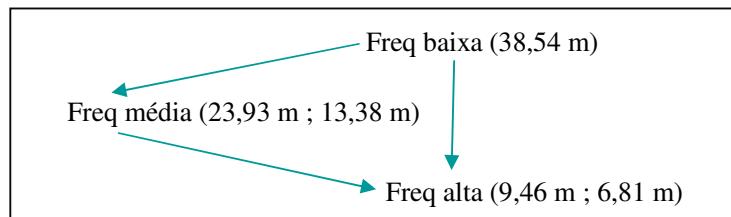


Figura 14 – Associação das espessuras, encontradas no periodograma do intervalo M200–M260 do poço PINDA-02-SP, com as freqüências baixas, médias e altas. Observar a relação e a hierarquização entre elas.

O passo seguinte foi gerar a matriz com os valores de espessura dos ciclos (tabelas 8 e 9) e comparar as razões encontradas com a matriz de Milankovitch (tabelas 1 e 2), levando em consideração a similaridade adotada de 91%. Os pares espessura–tempo que satisfizeram a condição foram organizados na Tabela 10, e assim foi calculada a taxa de acumulação. Os valores da Tabela 10 marcados em branco estão fora da margem de taxa de acumulação que varia entre 22,5 cm/ka e 50 cm/ka, sendo então, desconsiderados durante as próximas etapas.

Tabela 8 – “Matriz de espessura” contendo as espessuras encontradas no periodograma do intervalo M200 – M260 do poço PINDA-02-SP.

	<b>38,54</b>	<b>23,93</b>	<b>13,38</b>	<b>9,46</b>	<b>6,81</b>
<b>38,54</b>	1	1,61	2,88	4,07	5,66
<b>23,93</b>		1	1,79	2,53	3,51
<b>13,38</b>			1	1,41	1,96
<b>9,46</b>				1	1,39
<b>6,81</b>					1

Tabela 9 – Reorganização das razões obtidas na “matriz de espessura” do intervalo M200 – M260 do poço PINDA-02-SP.

<b>Razão</b>	<b>“Matriz de espessura” (m)</b>	
	<b>Período Longo</b>	<b>Período Curto</b>
5,66	38,54	6,81
4,07	38,54	9,46
3,51	23,93	6,81
2,88	38,54	13,38
2,53	23,93	9,46
1,96	13,38	6,81
1,79	23,93	13,38
1,61	38,54	23,93
1,41	13,38	9,46
1,39	9,46	6,81

Tabela 10 – Cálculo da taxa de acumulação do intervalo M200 – M260 do poço PINDA-02-SP, utilizado somente razões com similaridade igual ou superior a 91%.

<b>Período longo</b>			<b>Período curto</b>		
<b>Espessura</b>	<b>correlação</b>	<b>m/ka</b>	<b>Espessura</b>	<b>correlação</b>	<b>m/ka</b>
38,54	100,00	0,39	6,81	18,60	0,37
38,54	100,00	0,39	9,46	22,50	0,42
38,54	51,20	0,75	13,38	18,60	0,72
23,93	100,00	0,24	9,46	39,40	0,24
13,38	100,00	0,13	6,81	51,20	0,13
23,93	39,40	0,61	13,38	22,50	0,59
38,54	39,40	0,98	23,93	22,50	1,06
13,38	51,20	0,26	9,46	39,40	0,24
9,46	51,20	0,18	6,81	39,40	0,17

O passo seguinte foi confrontar os pares espessura–tempo que estiverem dentro da margem de taxa de acumulação com a primeira análise visual feita entre as espessuras do periodograma e o perfil de raios-gama, que encontra-se na Figura 14. Pode-se observar na Tabela 10, que existem pares espessura–tempo que possuem valores coerentes de taxa de acumulação, porém vão de encontro com a análise visual feita anteriormente (valores

marcados em amarelo), como exemplo, o comprimento de ciclo 23,93 m foi correlacionado nesta etapa do trabalho com o período de Milankovitch de  $100 \cdot 10^3$  anos, porém na análise visual foi correlacionado com períodos de freqüência média, ou seja, períodos de  $51,2 \cdot 10^3$  anos ou  $39,40 \cdot 10^3$  anos, não ocorrendo então uma correlação para esse comprimento de ciclo.

Os pares espessura–tempo, do intervalo M200 – M260 do poço PINDA-02-SP, aprovados em todas as etapas encontram-se destacados em cinza na Tabela 10 e foram organizados a seguir:

Tabela 11 – Espessuras de ciclos e períodos de Milankovitch para o intervalo M200–M260 no poço PINDA-02-SP.

Espessura (metros)	Correlação (ka)	Taxa de acumulação (m/ka)
38,54	100	0,39
13,38	51,2	0,26
9,46	22,5	0,42
6,81	18,6	0,37

Esse intervalo obteve uma taxa média de acumulação de 0,35 m/ka e 4 períodos de excentricidade curta, o que nos sugere um tempo mínimo de acumulação de 400 ka.

A espessura de 23,93 m não foi correlacionada a nenhum período de Milankovitch, já que durante os cálculos só se mostrou compatível com o período de  $100 \cdot 10^3$  anos, o que vai contra a análise visual e a correlação entre as espessuras (Figura 13), sendo então, tomada como incorreta e descartada. Logo, os comprimentos de ciclo de em média 18 m e 20 m foram atribuídos à variações de ciclo de 13,38 m, em função da variação da taxa de acumulação.

### 5.3 Intervalo M260 até a superfície

As principais espessuras de ciclos (Anexo 3) encontradas a partir do periodograma da Figura 15, obtido com os dados do intervalo M260 até a superfície do poço PINDA-02-SP,

são: 49,37 m; 19,03 m; 16,12 m; 10,46 m; 7,78 m e 6,32 m. Essas espessuras foram submetidas a uma primeira análise visual, sendo correlacionadas com o perfil de raios-gama (Figura 16). Essa análise possibilitou a compartimentação do perfil de raios-gama em dois intervalos de baixa freqüência, marcados por um pico de radioatividade (raios-gama alto) na base de cada ciclo.

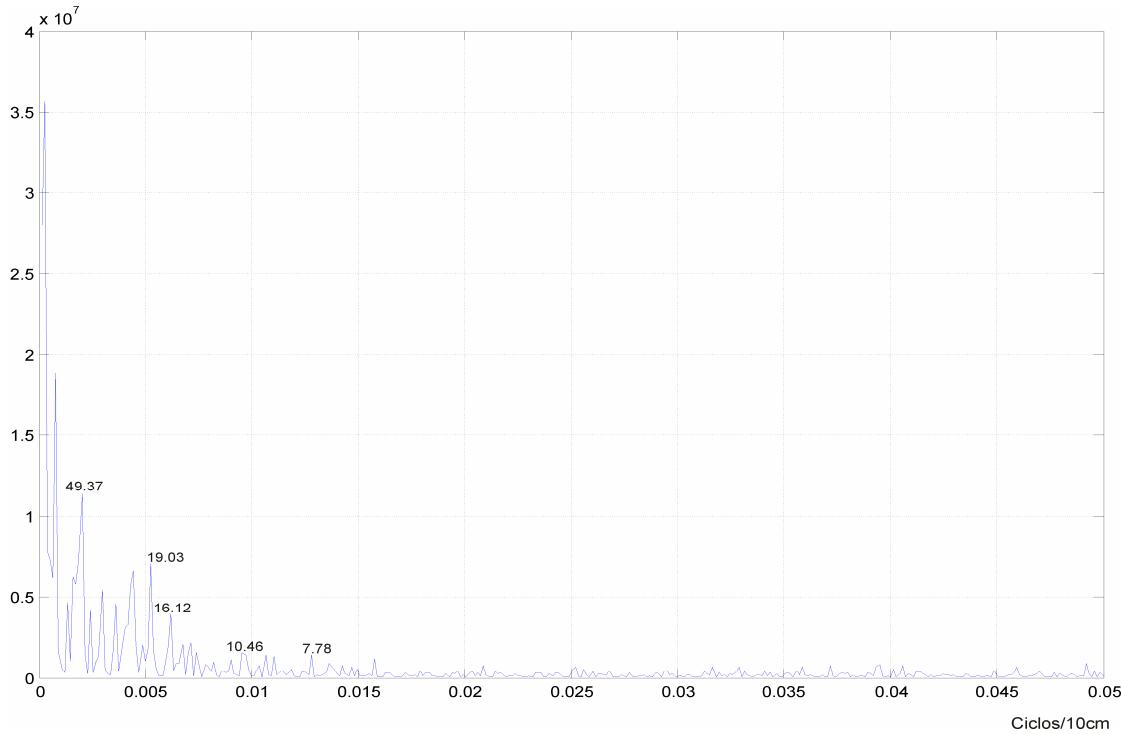


Figura 15 – Periodograma do intervalo M260 até a superfície com os valores de espessura (49,37 m; 19,03 m; 16,12 m; 10,46 m; 7,78 m e 6,32 m) dos ciclos correlacionáveis com o perfil de raios-gama.

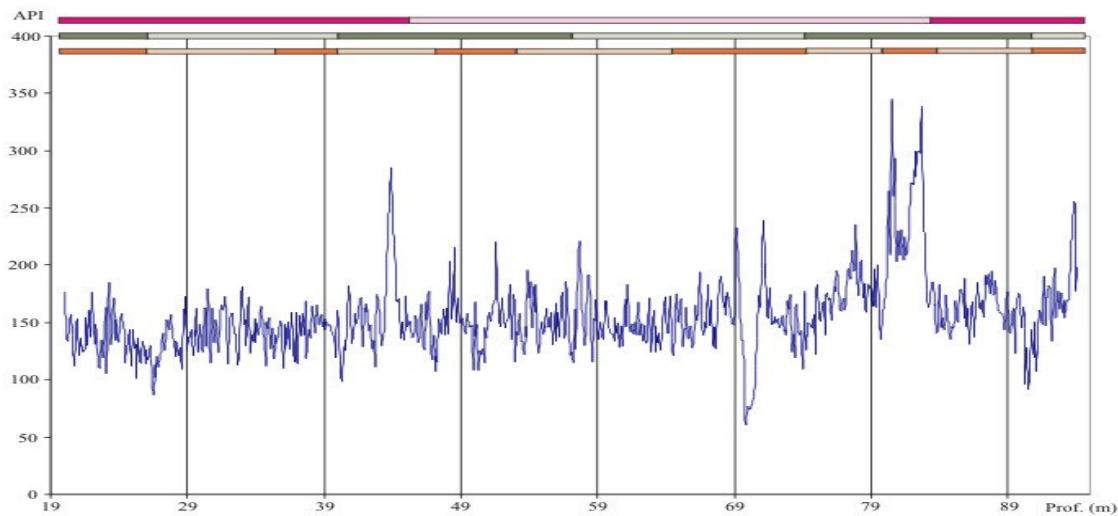


Figura 16 – Perfil de raios-gama do intervalo M260 até a superfície com os valores de espessura correlacionados; tons de rosa – períodos de excentricidade; tons de verde – períodos de obliquidade e tons de laranja – períodos de precessão.

Foi adotada a mesma sistemática utilizada nos intervalos anteriores, determinando a relação entre as espessuras (Figura 17), gerando a matriz com os valores de espessura dos ciclos (tabelas 12 e 13) e comparando-a com a matriz de Milankovitch (tabelas 1 e 2), com similaridade igual ou superior a 91%. Os pares espessura–tempo que satisfizeram a condição foram organizados na Tabela 13, e assim foi calculada a taxa de acumulação. Os valores da Tabela 13 marcados em cinza estão dentro da margem de taxa de acumulação que varia entre 22,5 cm/ka e 50 cm/ka e os em branco estão fora da margem, ou seja, foram descartados na etapa seguinte do trabalho.

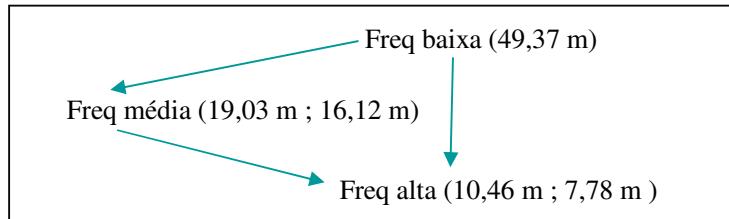


Figura 17 – Associação das espessuras encontradas no periodograma do intervalo M260 até a superfície com as freqüências baixas, médias e altas. Observar a relação e a hierarquização entre elas.

Tabela 12 – “Matriz de espessura” contendo as espessuras encontradas no periodograma do intervalo M260 até a superfície do poço PINDA-02-SP.

	<b>49,37</b>	<b>19,03</b>	<b>16,12</b>	<b>10,46</b>	<b>7,78</b>
<b>49,37</b>	1	2,59	3,06	4,72	6,35
<b>19,03</b>		1	1,18	1,82	2,45
<b>16,12</b>			1	1,54	2,07
<b>10,46</b>				1	1,34
<b>7,78</b>					1

Tabela 13 – Reorganização das razões obtidas na “matriz de espessura” do intervalo M260 até a superfície do poço PINDA-02-SP.

Período longo			Período curto		
Espessura	correlação	m/Ka	Espessura	correlação	m/Ka
49,37	100,00	0,49	10,46	22,50	0,46
49,37	100,00	0,49	19,03	39,40	0,48
19,03	100,00	0,19	7,78	39,40	0,20
16,12	39,40	0,41	7,78	18,60	0,42
19,03	39,40	0,48	10,46	22,50	0,46
10,46	51,20	0,20	7,78	39,40	0,20
19,03	22,50	0,85	16,12	18,60	0,87

O passo seguinte foi confrontar os pares de espessura–tempo que estavam dentro da margem de taxa de acumulação com a primeira análise visual feita entre as espessuras do periodograma e o perfil de raios-gama, que encontra-se na Figura 16. Como pode-se observar na Tabela 13, não existem pares de espessura–tempo que possuem valores coerentes de taxa de acumulação que vão de encontro com a análise visual feita anteriormente então, todos os pares espessura–tempo correlacionados nesta etapa foram tomados como correto e estão organizados na Tabela 14.

Tabela 14 – Espessuras de ciclos e períodos de Milankovitch para o intervalo M260 até a superfície no poço PINDA-02-SP.

Espessura (metros)	Correlação (ka)	Taxa de acumulação (m/ka)
49,37	100	0,49
19,03	39,40	0,48
16,12	39,40	0,41
10,46	22,50	0,46
7,78	18,60	0,42

Esse intervalo obteve uma taxa média de acumulação de 0,45 m/ka e 2 períodos de excentricidade, o que nos sugere um tempo mínimo de acumulação de 200 ka.

## 6 CONCLUSÕES

O estudo cicloestratigráfico na Formação Tremembé mostrou o possível controle astronômico (cilcos orbitais de Milankovitch) durante sua sedimentação, mais precisamente os períodos de excentricidade curta e precessão curta e longa presentes em todos os intervalos analisados. Os ciclos de obliquidade estão menos marcados no registro sedimentar em função da sua menor atuação em regiões de latitudes baixas ( $< 40^\circ$ ).

A identificação de doze ciclos, associados ao período de excentricidade curta, bem marcados ao longo do perfil de rios-gama do poço PINDA-02-SP, tornou possível estimar um tempo mínimo de sedimentação de 1,2 M.a. da parte superior da Formação Tremembé (70% da espessura total da Formação). Isto não está de acordo com Riccomini (1993), onde o autor estima um tempo de sedimentação para todo o pacote rochoso da Formação Tremembé de  $650 \cdot 10^3$  anos. Contudo, a estimativa feita no presente trabalho, se mostra mais precisa que os dados palinológicos apresentados por Yamamoto (1995), onde a autora data a sedimentação da Formação como oligocênica, cujo período envolve 10,9 M.a. ( $23,0 - 33,9 \pm 0,1$  M.a.) (ICS, 2005).

O aumento da taxa de sedimentação em direção ao topo da formação, se deve à diferença de compactação, uma vez que Sampol advoga que o paleoambiente desta parte superior é mais distal, proporcionando, então, uma taxa de sedimentação menor.

Este estudo abre a possibilidade de correlação estratigráfica na bacia e consequentemente com bacias da margem leste (Campos e Santos).

## Referências Bibliográficas

- AZAMBUJA FILHO, N.C. Cicloestratigrafia com refinamento estratigráfico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú, SC. **Boletim de resumos expandidos**, Balneário Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia, 1994. p.185-186.
- EINSELE, G.; RICKEN, W.; SEILACHER. Cycles and Events in Stratigraphy – Basic Concepts and Terms. In: EINSELE, G.; RICKEN, W.; SEILACHER (eds.) **Cycles and Events in Stratigraphy**. Germany: Springer-Verlag, 1991. Cap.1, p.1-19.
- FERNANDES, F.L. **Arcabouço estrutural e evolução da bacia de Taubaté**. 1993. 147 f. Tese (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Ouro Preto, Ouro Preto.
- FREITAS, M.S. **Estratigrafia de alta resolução e geoquímica orgânica da Formação Tremembé, Terciário da bacia de Taubaté, na região de Taubaté-Tremembé-SP**. 2007. 80 f. Tese (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GRADSTEIN, F.M.; OGG, J.G.; SMITH, A.G. *et al.* **A Geologic Time Scale**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- MARQUES, A. Evolução Tectono-sedimentar e Perspectivas Exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo: *Bol. Geoci. PETROBRAS*, v.4, n.3, p 253-263 , 1990.
- MOLINARI, L. **Interpretação sismoestratigráfica da bacia de Taubaté - SP**. 2003. 65 f. Tese (Monografia Final de Conclusão de Curso) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- RICCOMINI, C. **O rift continental da Serra do Mar**. 1989. 256 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- PERLMUTTER, M.A; MATTHEWS, M.D. Global Ciclostratigraphy – a model. In: CROSS, T.A. (ed.). **Quantitative dynamic stratigraphy**. New Jersey: Prentice Hall, 1989. p. 233-260.
- SAMPOL, J.F.G. **Estratigrafia de alta resolução da Formação Tremembé (Oligoceno, bacia de Taubaté) em poços de sondagem**. 2007. 31 f. Tese (Monografia Final de Conclusão de Curso) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SANSON, M.R.S. **Análise Estratigráfica da Formação Resende: caso de estudo de uma seqüência rifte na bacia de Resende, RJ**. 2004. 55 f. Tese (Monografia Final de Conclusão de Curso) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- SANT'ANNA, L.G.; RICCOMINI, C.; COIMBRA, A.M.; NETO, M.B.; VALARELLI, J.V. Argilominerais do paleolago tremembé e sistemas deposicionais relacionados (Paleógeno, *Rift* Continental do Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, v. 26, n. 3, p.167-180, set. 1996.
- SANT'ANNA, L.G. **Geologia, mineralogia e gênese das esmectitas dos depósitos paleogênicos do Rift Continental do Sudeste do Brasil**. 1999. 293 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SCHWARZACHER, W. Repetitions and cycles in stratigraphy. **Earth-Science Reviews**, v.50, p.51-75, 2000.
- SILVA. J.G.R. **Estudo de Cicloestratigrafia nos depósitos eopermianos do Grupo Itararé, Bacia do Paraná, nos estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul, baseado em dados de testemunho e de perfis de raios-gama**. 2001. 288 f. Tese (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- TAGLIAFERRI, R.; PELOSI, N.; CIARAMELLA, A.; LONGO, G.; MILANO, M.; BARONE, F. Soft computing methodologies for spectral analysis in cyclostratigraphy. **Computers & Geosciences**, v.27, p.535-548, 2001.
- TORRES-RIBEIRO, M. **Fácies microclásticas de um sistema lacustre oligocênico do Sudeste do Brasil (Formação Tremembé, Bacia de Taubaté)**. 2004. 122 f. Tese (Mestrado em Geociências) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- TORRES-RIBEIRO, M.; BORGHI, L. Bacias sedimentares brasileiras – Bacia de Taubaté. **Phoenix**, Aracajú, n.3, 6p., fev. 2005.
- VIDAL, A. C., Fernandes, F. L. & Chang, H. K. 2004. Distribuição dos arenitos na bacia de Taubaté – SP. **UNESP, Geociências**, São Paulo, v. 23, n. 1/2, p. 55-66, 2004.
- YAMAMOTO, I.T. **Palinologia das bacias do Sudeste (Bacias de Taubaté, São Paulo e Resende): Análise bioestratigráfica integrada e interpretação paleoambiental**. 1995. 217 f. Tese (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo.

## APÊNDICES

## Apêndice A

Tabelas com as profundidades, em metros, do topo e base de cada ciclo encontrado no intervalo M180–M200 do poço PINDA-02-SP.

<b>Excentricidade</b>	
Topo	Base
260,4	282,6
282,6	307,0
307,0	328,1
328,1	350,6
350,6	375,7
375,7	399,9

<b>Obliquidade</b>	
Topo	Base
247,9	257,5
257,5	267,1
267,1	282,4
282,4	293,3
293,3	307,0
307,0	320,6
320,6	333,6
333,6	345,0
345,0	355,5
355,5	367,1
367,1	381,3
381,3	391,9

<b>Precessão</b>	
Topo	Base
252,3	360,3
360,3	267,1
267,1	276,8
276,8	285,0
285,0	293,3
293,3	299,3
299,3	307,8
307,8	315,9
315,9	320,6
320,6	328,1
328,1	336,0
336,0	345,0
345,0	353,7
353,7	359,7
359,7	366,5
366,5	375,7
375,7	381,3
381,3	385,9
385,9	391,9
391,9	399,9

## Apêndice B

Tabelas com as profundidades, em metros, do topo e base de cada ciclo encontrado no intervalo M200–M260 do poço PINDA-02-SP.

<b>Excentricidade</b>	
Topo	Base
94,2	126,4
126,4	170,0
170,0	214,3
214,3	247,5

<b>Obliquidade</b>	
Topo	Base
99,9	113,0
113,0	126,4
126,4	153,0
153,0	170,5
170,5	185,6
185,6	197,5
197,5	205,7
205,7	218,3
218,3	231,3
231,3	247,5

<b>Precessão</b>	
Topo	Base
99,9	108,6
108,6	115,8
115,8	126,4
126,4	136,7
136,7	144,5
144,5	153,0
153,0	160,7
160,7	169,5
169,5	181,1
181,1	191,0
191,0	196,9
196,9	205,7
205,7	211,4
211,4	218,3
218,3	223,3
223,3	237,9
237,9	247,5

## Apêndice C

Tabelas com as profundidades, em metros, do topo e base de cada ciclo encontrado no intervalo M260 até a superfície do poço PINDA-02-SP.

<b>Excentricidade</b>	
Topo	Base
20,1	44,8
44,8	83,7

<b>Obliquidade</b>	
Topo	Base
26,3	40,4
40,4	57,4
57,4	74,0
74,0	90,5

<b>Precessão</b>	
Topo	Base
26,3	35,3
35,3	40,4
40,4	47,1
47,1	53,0
53,0	64,5
64,5	74,0
74,0	90,5