



ESTUDO DE CICLICIDADE ORBITAL COM BASE EM DADOS SÍSMICOS

ALVARO HENRIQUE AROUCA DE CASTRO
NILO CHAGAS DE AZAMBUJA FILHO

PETROBRAS S/A, Brasil

Abstract

Cyclostratigraphic analysis of a sonic well log and a seismic trace in a sedimentary succession of the Miocene in Campos Basin allowed to evaluate the potential of applying cyclostratigraphy to high-resolution seismic data. The method used to identify cycles in a sonic well log and put them in a hierarchical order, to establish their temporal magnitude and the mean accumulation rate of sediments was a combination of visual and spectral analysis. The correlation between the periodicities obtained from the spectral analysis with those of the Milankovitch band was then evaluated using a comparison of the similarity of their ratios. Similar analysis was done to the converted-to-depth seismic trace that coincides with the well projection on the seismic section. Different levels of success were obtained. They were dependent on the thickness of the sedimentary cycles and the seismic resolution. Cycle thickness is a function of accumulation rate; seismic resolution, considering the same acquisition parameters, varies conversely to the investigation depth. The sonic well log analysis revealed cycles associated to eccentricity (100 ka), obliquity (41 ka) and precession (23 and 19 ka). The rhythmicity in the sedimentary succession seems to be mostly influenced by precession cycles, excepts to the segment N-570c, where obliquity prevails. Accumulation rates range from 16.8 to 40cm/ka. The seismic trace spectral analysis allowed the identification of cycles with periods around 100 ka (eccentricity). Since the accumulation rates increase it is possible to relate cycles to obliquity (41 ka). Potentially, seismic may be a useful tool in cyclostratigraphy. However, it's necessary to maximize the temporal resolution, especially in the environments with lower accumulation rates.

Resumo

A Análise cicloestratigráfica de um perfil sônico de um poço e de um traço sísmico de uma seção sedimentar do Mioceno da Bacia de Campos permitiu a avaliação do potencial de aplicação da cicloestratigrafia em dados sísmicos de alta resolução. Foi utilizada uma combinação de análises visuais e espectrais para identificar e hierarquizar ciclos no perfil sônico, visando estabelecer sua magnitude temporal e as taxas médias de acumulação de sedimentos. Posteriormente, foi avaliada a correlação entre estas periodicidades e as periodicidades orbitais que afetam a insolação do Terra (Teoria de Milankovitch). Tratamento similar foi feito para o traço sísmico que coincide com a projeção do poço sobre a seção sísmica convertida para profundidade. Níveis diferentes de sucesso foram alcançados dependendo da espessura dos ciclos e da resolução sísmica. A espessura do ciclo é função da taxa de acumulação, enquanto a resolução sísmica, para os mesmos parâmetros de aquisição varia inversamente com a profundidade de investigação. A análise espectral da curva do sônico identificou ciclos associados à excentricidade (100 ka), obliquidade (41 ka) e precessão (23 e 19 ka). Este último parece ter sido o fenômeno de maior influência sobre a ritmicidade dos sedimentos, exceto no segmento N-570c, onde predomina a obliquidade. A taxa de acumulação variou de 16,8 cm/ka a 40 cm/ka. A análise espectral do traço sísmico possibilitou a identificação de ciclos com cerca de 100 ka. Quando há um incremento relevante na taxa de acumulação é possível associar ciclos sedimentares até com o período de 41 ka (obliquidade). O potencial de utilização da sísmica em cicloestratigrafia revelou-se muito bom. No entanto, é preciso que se maximize a resolução sísmica, especialmente nos ambientes com baixas taxas de acumulação

INTRODUÇÃO

A cicloestratigrafia é apontada como uma ferramenta de refinamento estratigráfico (Azambuja Filho, 1994), em especial para o Terciário tardio e Quaternário. Os dados coletados com a perfuração de poços de petróleo fornecem informações com alta resolução, que não devem ser extrapoladas para além de sua vizinhança; os dados sísmicos oferecem informações sobre uma região maior a um custo razoável, mas sua resolução é muito inferior à obtida em poços. Integrar os dois tipos de dados e utilizar a sísmica no refinamento estratigráfico, através de um controle por poços torna-se atraente. A aplicação prática e teste dos conceitos discutidos foi feita em um poço perfurado para a prospecção de petróleo e uma linha sísmica de excelente qualidade com razão de amostragem de 1 ms. Esta razão de amostragem, conjugada com outros parâmetros de aquisição, permite que sejam recuperadas frequências não-falseadas de até 500 Hz. O conteúdo de frequência nominal diminui à medida que a onda sísmica se propaga (absorção), o que limita a profundidade de utilização desta ferramenta em cicloestratigrafia.

CONTEXTO ESTRATIGRÁFICO

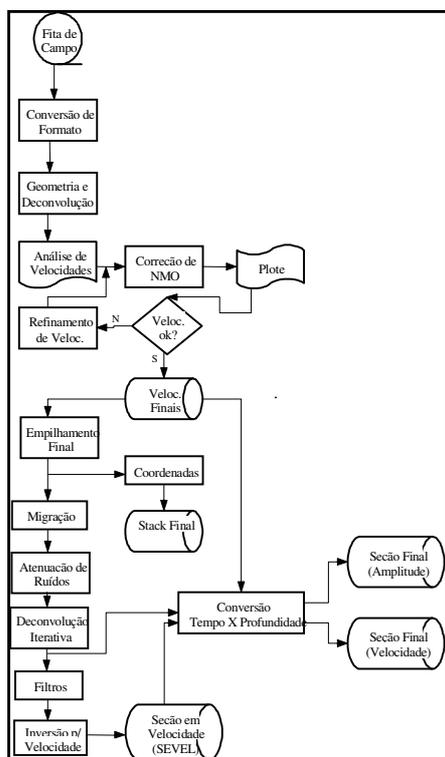
A seção de estudo abrange o intervalo desta seqüência que vai do topo da biozona de nanofósseis N-570 (16,2 Ma) ao topo da biozona N-560 (17,4 Ma). Compõe-se de uma alternância de margas cinza-claras/esverdeadas e folhelhos carbonáticos cinza-esverdeados, denotando, períodos de maior e menor produtividade carbonática associados a mudanças climáticas. A sucessão sedimentar situa-se em um complexo de cunhas progradantes de mar baixo, que alcança 1,2 km de espessura e cerca de 40 km de extensão na direção do mergulho do talude (Kowsmann & Vianna, 1992). As alternâncias marga/folhelho do Oligo-Mioceno da Bacia de Campos refletem mudanças de alta freqüência nas condições de deposição entre um regime transgressivo (margas), mais quente, e outro regressivo (folhelhos), mais frio. As oscilações dos volumes das capas de gelo teriam influenciado o nível eustático e as mais importantes teriam ocorrido na banda de Milankovitch (10 a 500 ka) (Azambuja Filho, 1990).

METODOLOGIA

Os parâmetros de aquisição (tabela 1) e o fluxograma de processamento (figura 1) foram estabelecidos para maximizar o espectro de freqüências e a resolução. Sobre os dados empilhados foi aplicada a deconvolução iterativa e a conversão para profundidade utilizando as funções velocidade das análises feitas para a correção dinâmica (NMO).

Afastamento Máximo	3200 m
Intervalo Entre Estações	13,33 m
Intervalo Entre CMPs	6,66 m
Multiplicidade	120
Tempo de Registro	4,5 s
Razão de Amostragem	1 ms
Filtro	18 - 350 hz

Tabela 1 - Principais parâmetros de aquisição da seção utilizada (compilada de Oliveira *et alii*, 1992)



(modificado de Oliveira *et alii*, 1992).

média (sem descompactação) da N-570 em 30 cm/ka. Embora esta taxa refira-se a um intervalo maior que os representados em cada segmento, ela serve para balizar a escolha de uma taxa de acumulação coerente. Seleccionada a taxa de acumulação, foram identificados os principais comprimentos de onda, relacionando-os com suas respectivas taxas de acumulação, para definir, assim, a duração de cada ciclo. Em seguida estimou-se o número de ciclos em cada segmento, para se determinar a duração (em ka) do segmento e, pela integração dos resultados, calcular o intervalo de

Os dados de poço utilizados foram o perfil sônico, as amostras de calha e a datação bioestratigráfica. A alternância cíclica margas/folhelho é evidente na descrição das amostras de calha e nos perfis adquiridos no poço. Ao longo do poço alternam-se domínios em que os ciclos exibem um aspecto dominante de mais alta e de mais baixa freqüência. Essas oscilações foram atribuídas a mudanças na taxa de acumulação. Embora o perfil de raios gama seja uma medida de argilosidade, optou-se pelo sônico devido à identidade de grandezas com o método sísmico. Ambos trabalham com a velocidade do meio rochoso, embora esta velocidade tenha significados matemáticos diferentes em cada caso.

O método de análise empregado foi adaptado de Azambuja Filho (1994). O sônico foi dividido visualmente em segmentos de acordo com as variações nas taxas de acumulação (figura 2) e em cada segmento foram feitas análises espectrais no traço sísmico e no perfil sônico, buscando-se identificar os valores de freqüências dominantes. Para a transformação destes valores em comprimentos de onda e atribuir-lhes condição de espessura de ciclos, dividiu-se, por cada valor, a razão de amostragem (0,2 m para o sônico e 1 m para a sísmica). Os valores assim obtidos foram utilizados na construção da matriz de correlação que foi comparada com a matriz de Milankovitch (tabela 2). Seleccionaram-se as razões com grau de similaridade igual ou superior a 95%. A linha de evidência citada por diversos autores para demonstrar o controle dos ciclos de Milankovitch sobre o registro sedimentar é (1) a recorrência da razão entre ciclos correspondentes às que ocorrem entre os períodos de parâmetros orbitais de Milankovitch e (2) que os períodos calculados correspondam aos do parâmetro orbital em questão (Algeo & Wilkinson, 1988). Em seguida, foram correlacionados os períodos orbitais com as espessuras dos ciclos para se obter as taxas de acumulação. Com base nos limites estabelecidos para a biozona no poço de estudo (1994 a 2351) e na duração da biocronozona associada (1,2 Ma - Azevedo *et alii*, 1992), estimou-se a taxa de acumulação

tempo de toda a seção, comparando-o com os resultados da bioestratigrafia. Análise semelhante foi feita para a série composta pelos dados sísmicos.

ka	410	100	41	23	19
410	1,00	4,10	10,00	17,83	21,58
100		1,00	2,44	4,35	5,26
41			1,00	1,78	1,78
23				1,00	1,21
19					1,00

Tabela 2 - Matriz de Milankovitch exibindo as razões entre os principais parâmetros orbitais: excentricidade (410 e 100 ka), obliquidade (41 ka) e precessão (23 e 19 ka)

um processo, é preciso que pelo menos uma amostra seja obtida a cada meio comprimento de onda. Períodos com menos de dois ciclos inteiros devem ser questionados (Schulz & Mudelsee, 1997). A resolução do perfil sônico é de cerca de 0,60 m e pode ser calibrada por outros dados de poço. A resolução sísmica está sujeita à influência de diversos fatores (parâmetros de aquisição e registro dos dados, características próprias do pulso sísmico e de cada meio atravessado, etc.). A frequência dominante é de cerca de 50 Hz para a N-570 cujo espectro exibe níveis significativos de energia até 90 Hz. A curva do perfil sônico apresenta valores em torno de $120 \cdot s/pé$ (velocidade intervalar de 2540 m/s). A resolução obtida com estes valores (segundo o critério pelo qual a resolução é igual a um quarto do comprimento de onda dominante) é de 12,70 m.

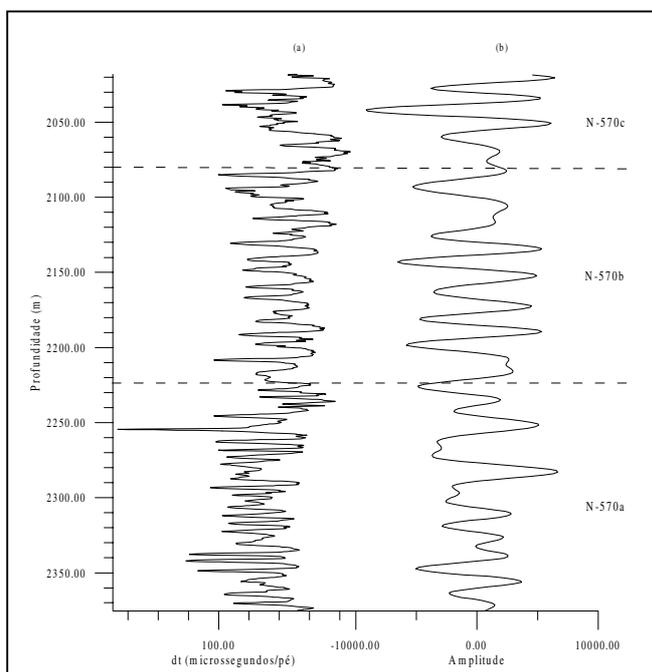


Figura 2 - Perfil sônico “espelhado” (a) e traço sísmico (b) para a biozona N-570. Observar as diferentes resoluções alcançadas em cada conjunto de dados.

A associação da matriz composta pelos valores mais significativos da análise espectral com a matriz de Milankovitch sugere que os picos em 0,006006 (33,3 m de espessura), 0,025526 (7,83 m) e 0,037538 (6,34 m) ciclos/m, podem ser associados aos períodos de excentricidade curta (100 ka), precessão longa (23 ka) e precessão curta (19 ka), respectivamente (figura 3). A taxa de acumulação seria de 33 cm/ka. Na análise visual e na análise espectral observa-se o predomínio do ciclo precessional (23 ka) com espessuras de 5 a 8 m. A multiplicação do número de ciclos deste tipo presentes (21) pela duração média de 23 ka, produz uma duração de 420 ka para o intervalo. No sônico, em alguns pontos, o ciclo precessional parece modular ciclos com comprimento de onda menor (1 m). Possivelmente, estes ciclos também correspondem à precessão longa, mas, por uma queda local na taxa de acumulação, sua espessura não evoluiu como no resto do segmento. Se assim for, o número de ciclos no intervalo sobe para 28 e o tempo de deposição total vai a 644 ka. No espectro de frequência dos dados sísmicos (figura 4) destacam-se os picos com 0,02381 (42 m), 0,39683 (25,2 m), 0,055556 (18 m) e 0,071429 (14 m) ciclos/m (14 m). A resolução calculada para esta biozona foi de 12,7 m. Considerando-se a taxa de sedimentação em torno de 30 cm/ka, com esta resolução seria factível registrar os ciclos com período de 100 ka ou superior. O ciclo com período de 41 ka teria uma espessura de 12 m, e sua identificação na sísmica ficaria comprometida.

É possível que o ciclo detectado nos dados sísmicos com 25 m corresponda à excentricidade curta (100 Ka), remetendo, para a posição do traço sísmico, a uma taxa de acumulação menor do que a inferida pelo sônico (25 cm/ka).

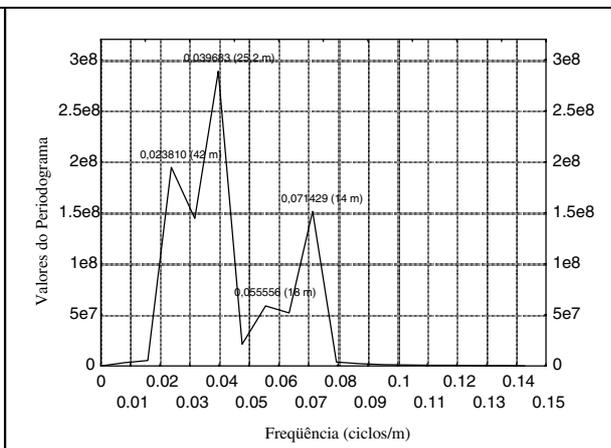
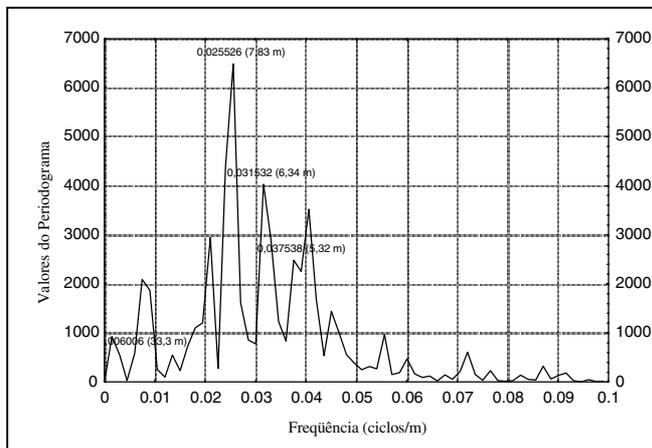


Figura 3 - Análise espectral do perfil sônico para o segmento N-570a.

Figura 4 - Análise espectral do traço sísmico em amplitude para o segmento N-570a.

O mesmo procedimento foi feito para os segmentos N-570b e c.

CONCLUSÕES

N-570a: a análise serial do perfil sônico identificou ciclos com 100, 23 e 19 ka. A taxa de acumulação foi de cerca de 27 cm/ka, e o segmento foi depositado em cerca de 420 ka, com predomínio da precessão na sedimentação. A análise do traço sísmico revelou um ciclo dominante com 21 m de espessura. A resolução sísmica calculada para a biozona N-570 foi de 12,7 m. Esta resolução seria suficiente para distinguir ciclos com período de 100 ka, que, no perfil sônico, possui cerca de 27 m de espessura. Os demais ficariam abaixo da resolução sísmica. Se o ciclo com 21 m de espessura for equivalente ao de 100 ka de período, a taxa de sedimentação, na posição geográfica do traço sísmico, seria de 21 cm/ka, um pouco inferior à verificada no poço (a distância entre os dois pontos é de quase 3 km).

N-570b: foram identificados, pela análise serial do sônico, ciclos associados aos períodos de 100, 41, 19 e 23 ka. A taxa de acumulação seria da ordem de 40 cm/ka, e o segmento ter-se-ia depositado em cerca de 460 ka. Os ciclos relacionados com a precessão parecem predominar. Na análise do traço sísmico destaca-se o ciclo com 19 m de espessura, provavelmente relacionado à obliquidade (41 ka). A identificação de um ciclo com período relativamente curto foi possível graças ao incremento na taxa de acumulação. Contudo, a resolução impediu que os ciclos precessionais fossem distinguidos. Não foi possível, nos dados sísmicos, distinguir os ciclos com 100 ka de período. Talvez a composição de fatores locais com este comprimento de onda os tenham obscurecido.

N-570c: na análise serial do perfil sônico distinguiram-se ciclos com períodos de 100, 41, 23 e 19 ka. A taxa de acumulação seria da ordem de 22 cm/ka, e a duração total, de 369 ka. Destacou-se o ciclo relacionado à obliquidade na análise espectral do perfil sônico. Na análise do traço sísmico, destacou-se um ciclo com 19 m de espessura. Com base na resolução sísmica calculada, estima-se que apenas o ciclo de 100 ka poderia ser registrado, com a taxa de acumulação calculada para o segmento. De fato, é possível que este ciclo com 19 m de espessura e aquele identificado no perfil sônico para o período de 100 ka (espessura de 20 m) sejam equivalentes.

Assim, com base na cicloestratigrafia feita a partir da curva do perfil sônico, estimou-se que a seção compreendida entre os topos das biozonas N-570 e N-560 foram depositadas em cerca de 1,25 Ma. Pela bioestratigrafia a duração total desta biozona seria de cerca de 1,2 Ma, com taxa média de deposição da ordem de 30 cm/ka.

A diferença no conteúdo de freqüências dos dois tipos de dados explica-se pela diferença de resolução das ferramentas. A resolução dos perfis de poço é da ordem de 60 cm; a sísmica, mesmo em área de excelente qualidade e com conteúdo de freqüências mais alto que o convencional, alcança, no máximo, 12,7 m, no intervalo de estudo. O meio de contornar esta limitação seria a aquisição de dados sísmicos com conteúdo de freqüências mais próximo ao de perfis, o que, atualmente é inviável para as profundidades investigadas devido ao efeito discriminante da terra (absorção). As tentativas de se elevar o conteúdo de freqüências dos dados sísmicos no processamento mostraram-se insuficientes. Com a obtenção de resoluções sísmicas próximas a de perfis multiplicar-se-iam as informações pontuais dos poços pelas grandes áreas cobertas por sísmica a um custo significativamente menor. Isto resultaria em um refinamento cronoestratigráfico significativo e em um maior entendimento da influência dos parâmetros orbitais sobre a sedimentação no planeta ao longo do tempo. O potencial de utilização da sísmica no refinamento estratigráfico através da cicloestratigrafia é muito bom. Para viabilizar este novo uso da sísmica é interessante que o horizonte investigado seja suficientemente raso para minimizar o efeito filtrante de altas freqüências do solo; e que o ambiente geológico propicie taxas de sedimentação relativamente altas (quanto mais a premissa anterior for violada, mais esta precisa ser verdadeira); que a aquisição sísmica dê-se com parâmetros que visem a recuperação do maior conteúdo de altas freqüências possível; e que o intervalo a ser investigado tenha seus limites cronoestratigráficos bem controlados.

REFERÊNCIAS

- ALGEO, T.J. & WILKINSON, B.H. 1988. Periodicity of mesoscale Phanerozoic sedimentary cycles and the role of Milankovitch orbital modulation. *Journal of Geology*, v.96, pp: 313-322.
- AZAMBUJA FILHO, N. C. DE. 1990. The oligo-miocene turbidites and associated facies of the Campos Basin, Offshore Brazil. (Phd. Thesis, Imperial College of London). 456 pp
- AZAMBUJA FILHO, N. C. DE. 1994. Cicloestratigrafia como refinamento estratigráfico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., Camboriú, **Boletim de Resumos Expandidos**, v.1, pp: 585-586.
- AZEVEDO, R. L (coord.), SHIMABUKURO, S.; ARAI M.; UESUGUI, N. & TELLES, A. S. 1992 - Bacia de Campos. In: BEURLIN, G. (coord.); RICHTER, A. J.; CUNHA, A. S.; TELLES, A. S.; MARTINIS, E.; PEDRÃO, E.; MOURA, J. A.; GOMIDE, J. VIVIERS, M. C.; ARAI M.; UESUGUI, N.; NASCIMENTO, N. L. do; AZEVEDO, R. L.; DINO, R.;

ANTUNES, R. L.; SHIMABUKURO, S. & ABREU, W. S. DE. Bioestratigrafia das Bacias Mesozóicas-Cenozóicas Brasileiras. Volume I: Bacias de Pelotas a Sergipe-Alagoas. PETROBRAS/CENPES/SEBIPE. Rel. Int., pp 79-137.

OLIVEIRA, C.H.B., CASTRO, D.D., SIRIANI, J.C., GUIMARÃES, M.A.G. & LENGELER, R.L. 1992. Programa Sísmico Digital Multicanal de Alta Resolução na Bacia de Campos. **Informe Geofísico** no. 96. 10 pp. Petrobrás/Gerex/Getag (Publicação de circulação restrita).

SCHULZ, M. & MUDELSEE, M. 1997. Simultaneous presence of orbital inclination and eccentricity in proxy climate records from Ocean Drilling Program Site 806: comment. **Geology**. v.25, pp: 860-861.