ESTUDO DE CICLICIDADE ORBITAL COM BASE EM DADOS SISMICOS - EXEMPLO PARA O MIOCENO DA BACIA DE CAMPOS

ALVARO HENRIQUE AROUCA DE CASTRO

Abstract *ORBITAL CICCLICITY STUDY BASED ON SEISMIC DATA-EXAMPLE FOR THE MIOCENE OF CAMPOS BASIN*

- The feasibility of using seismic data to evaluate the effects of variations of main orbital factors over the depositional cycles is evaluated, in order to turn seismic into a major stratigraphy refinement tool. The concepts were tested in seismic and well data in Campos Basin, Brazil.

First, it was performed a visual interpretation of the well sonic log, along with the biostratigraphic data, in order to split the section in segments with same accumulation rate. Spectral analysis treatments were applied to each segment to identify its most significant frequencies. The seismic trace that coincides with the position of the well was converted to depth, divided in intervals equivalent to those segments defined along the sonic log, and also submitted to spectral analysis. Next it was evaluated the correlation between the frequencies found in each dataset and those of the phenomena (eccentricity, obliquity and precession) that affect the Earth orbit (Milankovitch Theory). The studied material was integrated, and the results were evaluated, considering the limitations of the tools used. Different levels of success were achieved in each segment, depending on the thickness of the prevalent cycle and the seismic resolution. The cycle thickness depends directly on the sedimentary accumulation rate, while the seismic data resolution varies conversely to the investigation depth, due to the absorption of high frequencies.

It was possible, through the sonic well log spectral analysis, to identify cycles related to eccentricity (410 and 100 ka), obliquity (41 ka) and precession (23 and 19 ka). The most influent phenomenon on the sedimentary accumulation seems to be precession, except for the sediments accumulated between the tops of biozones N-570 and N-580, where obliquity prevails. Accumulation rates varied from 4.5 cm/ka (N-560a) to 40 cm/ka (N-570b). The seismic trace spectral analysis allowed the identification of cycles related to eccentricity (100 ka). Where the segment was long enough, despite the low accumulation rate, it was possible to identify also the cycle related to the 410 ka period (N-560a). When there is a significant improvement in the accumulation rates, it is possible to correlate cycles even to the 41 ka period (N-570b), despite the relatively low seismic resolution (12.7 m).

Resumo A viabilidade da utilização de dados sísmicos na avaliação dos efeitos dos principais parâmetros orbitais sobre os ciclos deposicionais é avaliada, na tentativa de se utilizar a sísmica como uma importante ferramenta de refinamento estratigráfico. Os conceitos envolvidos foram testados em uma seção sísmica e em um poço adjacente na Bacia de Campos, Brasil.

Inicialmente foi feita uma interpretação visual do perfil sônico, integrada com os dados bioestratigráficos, visando dividir a seção sedimentar em segmentos de mesma taxa de acumulação. A cada segmento foi aplicado um tratamento de análise espectral para identificar suas principais frequências. O traço sísmico que coincide com a posição do poço foi convertido para profundidade, dividido em intervalos equivalentes aos segmentos definidos no perfil sônico, e também submetido à análise espectral. Foi avaliada, então, a correlação entre as frequências encontradas em cada conjunto de dados e as dos fenômenos (excentricidade, obliquidade e precessão) que afetam a órbita da Terra (Teoria de Milankovitch). O material estudado foi integrado, e os resultados avaliados, considerando-se as limitações das ferramentas utilizadas. Níveis diferentes de sucesso foram alcançados em cada segmento dependendo da espessura dos ciclos dominantes e da resolução sísmica. A espessura do ciclo é função direta da taxa de acumulação, enquanto a resolução sísmica varia inversamente com a profundidade de investigação, devido à absorção de altas frequências pelo solo.

Foi possível, através da análise espectral da curva do perfil sônico, caracterizar ciclos associados à excentricidade (410 e 100 ka), obliquidade (41 ka) e precessão (23 e 19 ka). Este último fenômeno parece ter sido o de maior influência sobre a ritmicidade da deposição dos sedimentos, exceto para os sedimentos depositados entre os topos das biozonas N-570 e N-580, onde predomina a obliquidade. A taxa de acumulação variou entre 4,5 cm/ka (N-560a) e 40 cm/ka (N-570b). A análise espectral do traço sísmico possibilitou a identificação de ciclos, em geral, com cerca de 100 ka. Onde o intervalo é suficientemente longo, apesar da baixa taxa de acumulação, torna-se possível identificar também o ciclo associado ao período de 410 ka (N-560a). Quando há um incremento relevante na taxa de acumulação, é possível associar ciclos sedimentares com o período de 41 ka (N-570b), apesar da resolução relativamente baixa - 12,7 m).

INTRODUÇÃO A cicloestratigrafia vem sendo utilizada como ferramenta de refinamento estratigráfico (Azambuja Filho, 1994), especialmente para o Neogeno. A associação de um ciclo sedimentar a um ciclo climático controlado por alterações na órbita do planeta, de período conhecido, permite estabelecer medidas absolutas de tempo (Kuhnt et alii, 1997) para este ciclo sedimentar. A natureza externa à bacia das causas da repetitividade dos ciclos sedimentares abre ainda a perspectiva de se utilizar a cicloestratigrafia como ferramenta de correlação até mesmo entre bacias distintas (Sprenger & Kate, 1993a; Sprenger & Kate, 1993b; Pittet & Strasser, 1998).

A aplicação destes conceitos foi feita sobre um poço e uma linha sísmica adquirida com razão de amostragem de 1 ms, razão de amostragem que, conjugada a outros parâmetros de aquisição, permite a recuperação de frequências de até 500 Hz. Esse con-

teúdo de frequência nominal, contudo, diminui à medida que a onda sísmica se propaga, devido à absorção, impondo um limite prático de profundidade à aplicação da técnica proposta.

Dados obtidos com a perfuração de poços de petróleo fornecem informações, que, em geral, não podem ser extrapoladas com segurança para além da vizinhança da perfuração. Dados sísmicos, por outro lado, oferecem informações sobre uma região mais ampla a um custo razoável, mas com resolução inferior. A integração dos dois tipos de dados permite utilizar a sísmica no refinamento estratigráfico, com o controle das informações por meio dos poços disponíveis.

A certeza de que alternâncias nas condições climáticas do planeta favorecem a deposição de um ou outro tipo de rocha (alternância margas/folhelho, por exemplo, no Mioceno da Bacia de Campos), e, em consequência, induz uma ciclicidade sen-

sível ao método sísmico, é um pressuposto do trabalho. Outra premissa é que essas variações climáticas foram provocadas ou potencializadas por mudanças na taxa de insolação devida a alterações cíclicas nos componentes de sua órbita em torno do Sol (Teoria de Milankovitch).

As questões que se apresentam, então, são: (a) há influência orbital na sedimentação do Mioceno na Bacia de Campos? (b) que ciclos orbitais podem ser identificados a partir dos dados de poço? (c) que ciclos orbitais podem ser visualizados nos dados sísmicos? (d) como a resolução sísmica pode ser aumentada em busca de ciclos com maior frequência? e (d) em que circunstâncias é válida a utilização de dados sísmicos na cicloestratigrafia?

A CICLICIDADE ORBITAL NO REGISTRO SEDIMENTAR Uma revisão histórica da associação de variações nos parâmetros orbitais da Terra com o registro geológico pode ser encontrada em Berger (1988). Um dos fatos principais foi a publicação por Milankovitch (1941) de seus trabalhos quantificando os reflexos da insolação terrestre em função das variações na excentricidade, obliquidade e precessão da órbita da Terra durante o Pleistoceno, lançando as bases para a associação entre a deposição de sedimentos e variações globais no clima do planeta devido àqueles fenômenos (Teoria de Milankovitch). Hays et alii (1976) inauguraram a fase moderna do estudo, com a análise espectral de testemunhos do Índico. São raras as referências sobre a utilização da sísmica no estudo de ciclicidade orbital (Meltzer, 1997; Grützner et alii, 1997).

A deposição e preservação de depósitos que tragam impressos os ciclos de Milankovitch dependem do ambiente deposicional, da latitude, da importância da sazonalidade no suprimento sedimentar e dos processos deposicionais atuantes na bacia. Os sistemas tectonicamente estáveis e sensíveis às alterações climáticas (lagos e bacias restritas) são mais favoráveis à identificação da indução orbital (Algeo & Wilkinson, 1988). Ambientes parálicos (deltas, planícies de maré, etc.) possuem menor potencial de preservação.

O caráter do sedimento em águas profundas depende principalmente do suprimento de sedimentos do continente, e da produção biogênica de carbonato, sílica e matéria orgânica. O percentual de contribuição de cada um dependerá de fatores

geográficos, como distância do continente, sistemas de circulação atmosférica, contribuição de sedimentos eólicos e matéria orgânica terrestre, e padrões de circulação oceânica influenciando a produtividade em águas superficiais (De Boer & Smith, 1994). As mudanças de insolação no ambiente pelágico podem afetar a produção através de mudanças na disponibilidade de nutrientes derivados do continente.

Classificar fenômenos cíclicos em ordens e usar o termo ciclo sedimentar pode dar a impressão de que ciclos representam períodos de tempo equivalentes. Isso não é necessariamente verdade, e a maioria dos autores utiliza o termo apenas para descrever sucessões repetidas de litologia e fácies. Em seqüências rítmicas geradas predominantemente por processos autogênicos, fica claro que eles são o resultado de eventos sedimentológicos freqüentes, mas irregularmente recorrentes. Em contraste, alguns tipos de acamamento cíclico, e certas seqüências cíclicas, podem refletir processos dominados alogenicamente com um período de tempo regular.

CONTEXTO ESTRATIGRÁFICO A seção sedimentar escolhida para aplicar a metodologia desenvolvida insere-se na Seqüência Oceânica Progradante de Dias et alii (1990), depositada do Eoceno ao Recente. A seção de estudo abrange o intervalo entre os topos das biozonas de nanofósseis N-550 (18,9 Ma, Mesoburdigaliano) e N-580 (14,4 Ma, Eoserravaliano), sendo representada pela alternância de margas cinza-claras/esverdeadas, micáceas, e folhelhos cinza-esverdeados, siltícos, micáceos, piritosos e carbonáticos, com a ocorrência secundária de arenitos turbidíticos (Figura 1). O arcabouço estratigráfico para a análise de ciclicidade foi apoiado nos trabalhos desenvolvidos pelo grupo de geólogos e geofísicos da Petrobras que exploram a Bacia de Campos. Os limites utilizados são uma composição destes trabalhos e das observações e interpretações feitas sobre o material disponível (um poço e um trecho de seção sísmica).

Segundo Kowsmann & Viana (1992), a sucessão abordada inclui-se em um complexo de cunhas progradantes de mar baixo (Posamentier & Vail, 1988), com até 1200 m de espessura e cerca de 40 km de extensão na direção do mergulho do talude. São siltitos, folhelhos e margas de idade Eo- e Mesomioceno que progradam sobre turbiditos oligomiocênicos. A última cunha de

Tabela 1 -Estatística dos tipos litológicos ao longo do poço, discriminados pelos segmentos estabelecidos para a análise serial.
(Fonte: descrição de amostras de calha feita pela Petrobras).

	Biozona N-560				Biozona N-570			Biozona N-580		
	a	b	c	d	a	b	c	a	b	c
Limite superior (m)	2530	2499	2442	2351	2118	2056	1994	1896	1764	1659
Limite inferior (m)	2586	2530	2499	2442	2351	2118	2056	1994	1896	1764
Espessura (m)	56,0	31,0	57,0	91,0	133,0	162,0	62,0	98,0	132,0	105,0
Duração da biozona (Ma)	1,5				1,2			1,8		
Taxa de acumulação da biozona (cm/ka)	16				30			19		
% de folhelho	75,0	79,0	40,0	48,9	65,2	44,1	56,5	29,1	86,0	23,5
% média de folhelho	60,73				55,23			46,20		
% de marga	25,0	21,0	60,0	51,1	34,8	55,9	43,5	70,9	14,0	76,2
% média de marga	29,17				44,77			53,80

Figura 1. Carta Estratigráfica do Terciário da Bacia de Campos (Rangel et al., 1994).

mar baixo e o trato de mar baixo que lhe sucede, é truncada por uma discordância do Neomioceno Inferior, que os separa do pacote plio-pleistocênico. Para Azambuja Filho (1990), as alternâncias marga/folhelho do Oligo-Mioceno da Bacia de Campos representam mudanças de alta frequência 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 (glaciação e deglaciação) teriam influenciado o nível estático do mar e as oscilações mais importantes ocorrem dentro da banda de Milankovitch.

Arthur & Dean (1991) acreditam que a ciclicidade em materiais pelágicos adviria de (1) mudanças cíclicas na produção e acumulação de material plântônico por variações em *upwelling* ou salinidade; (2) mudanças cíclicas no clima, intemperismo, lixiviação e taxas de suprimento de terrígenos que diluiriam os fluxos de componentes biogênicos e/ou (3) flutuações na estabilidade da coluna d'água e na produção, circulação e oxigenação de águas de fundo que produziriam mudanças na preservação e acumulação de matéria orgânica e carbonato. Em climas quentes, a entrada de siliciclásticos é maior sob chuvas altamente sazonais, que impedem a instalação de uma vegetação densa. Condições não-sazonais favoreceriam a deposição carbonática. A alternância entre rochas siliciclásticas e químicas no registro geológico parece estar relacionada não só a mudanças climáticas, mas também a variações do nível do mar e à recorrência de eventos tectônicos (Cecil, 1990).

A tabela 1 exhibe a variação no conteúdo de carbonato e argila ao longo do poço de estudo nos vários segmentos em que este foi dividido.

Observa-se um aumento no percentual médio de carbonato das biozonas N-560 para a N-580. Em cada biozona observa-se uma alternância entre períodos com mais folhelho ou carbonato, o que pode indicar tendência a um clima mais seco para o topo, com variações climáticas de mais alta frequência em cada segmento. Em relação à espessura das camadas, os valores variam

Tabela 2 – Sumário bioestratigráfico e paleoecológico do poço de estudo no intervalo de interesse (modificado do original produzido pelo Centro de Pesquisas da Petrobras.)

INTERVALOS (M)	ZONAS INTEGRADAS	CRONOESTRATIGRAFIA	AMBIENTE
1611-1683	N-590	MIOCENO MÉDIO	MARINHO
1683-2007	N-580		
2007-2619	N-570	MIOCENO INFERIOR	
2619-2727	N-550		

Tabela 3 - 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).

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

em cada segmento, mas com uma tendência de aumento para o topo do intervalo, tanto para as camadas de folhelho quanto de

marga. Esta tendência só não fica mais clara devido ao peso do segmento N-560a, que possui valores de espessura anômalos.

METODOLOGIA Foram utilizados, assim, dois tipos de dados: sísmicos e de poço. Dados sísmicos são aqueles adquiridos pelo método sísmico de reflexão e representados aqui por um traço sísmico em amplitude, com escala vertical convertida para profundidade (Figura 2), extraído de uma seção sísmica com escala vertical originalmente em tempo duplo (Figura 3). Dados de poços são os obtidos com a perfuração do poço, ou a partir do material recolhido durante a perfuração (amostras de calha). São eles: perfil sônico (Figura 4) e análise bioestratigráfica (baseada em nanofósseis) (Tabela 2).

A escolha dos dados sísmicos utilizados levou em consideração a razão de amostragem com que foram levantados. Este fator favorece a obtenção de resolução sísmica vertical mais alta do que a geralmente obtida com esta ferramenta. O poço de trabalho foi escolhido por ser, nas vizinhanças da seção sísmica escolhida, um dos que apresenta o conjunto de dados mais completo para o Mioceno. A seção sísmica utilizada foi adquirida e processada originalmente pela Petrobras com parâmetros de aquisição e fluxograma de processamento estabelecidos para maximizar o espectro de frequências e, conseqüentemente, a resolução. Assim, não se detectou a necessidade do reprocessamento dos dados, optando-se por aplicar apenas os recursos que não haviam sido tentados ao tempo do processamento original (basicamente a deconvolução iterativa). O fluxograma e os programas utilizados foram os mesmos do processamento convencional, diferindo apenas nos parâmetros empregados (Oliveira et alii, 1992). O espectro de frequência dos dados exibe frequências dominantes entre 50 e 60 Hz, para o traço sísmico como

Figura 2 - Traço sísmico com escala em profundidade.

Figura 3 - Seção sísmica com o arcabouço estratigráfico utilizado.

Tabela 4 – Resoluções sísmicas verticais obtidas para cada biozona.

BIOZONA	Frequência Dominante (fd, em Hz)	Velocidade Intervalar Média (V, em m/s)	Resolução Média (R, em m) $R = V/4.f_d$
N-560:	80	2770	8,66 m
N-570:	50	2540	12,70 m
N-580:	85	2180	6,41 m

Figura 4 - Perfil sônico do poço utilizado.

Figura 5 – Espectro de frequência do traço selecionado.

Figura 6 – Espectros de amplitude dos intervalos compreendidos pelas três biozonas.

um todo (Figura 5). Dependendo do intervalo investigado, este valor pode oscilar de 50 Hz a 90 Hz. Para essa faixa de frequência (f_d) e uma velocidade (V) de cerca de 3000 m/s, a resolução máxima (DZ) obtida seria da ordem de $DZ = V/4f_d = 15$ m. (para $f_d = 50$ Hz).

Sobre os dados já empilhados foi aplicada a deconvolução iterativa e feita a conversão para profundidade utilizando-se os campos de velocidade obtidos nas análises de velocidade para a aplicação da correção dinâmica. O traço sísmico mais próximo à posição do poço foi selecionado, e sobre ele aplicados os procedimentos de análise estatística utilizados na análise do perfil sônico.

Os dados de poço utilizados foram o perfil sônico e a datação bioestratigráfica. O sônico exibe uma clara alternância de padrões de alta frequência associados às alternâncias entre as fácies mais carbonáticas e mais argilosas da formação. Nota-se ao longo do perfil uma distribuição de domínios em que a alternância entre as fácies se processa com velocidades diferentes. Este fenômeno foi atribuído a variações na taxa de sedimentação ao longo do tempo de deposição.

O método de análise foi adaptado de Azambuja (1994). Inicialmente, o sônico foi dividido visualmente em segmentos de mesma frequência, considerando-se as variações de frequência ao longo do poço como devidas a variações nas taxas de sedimentação ao longo do tempo. Para cada segmento foram feitas análises espectrais no traço sísmico e no sônico, buscando-se

Figura 7 - Perfil sônico (a) e traço sísmico (b) para a biozona N-570.

Tabela 5 – Tabela associando os períodos orbitais (em ka), taxas de acumulação (em cm/ka) e espessuras de ciclos sedimentares (em m).

PERÍODO	TAXAS DE ACUMULAÇÃO (cm/ka)									
	1	2	5	10	15	20	25	30	35	40
19	0,19	0,38	0,95	1,9	2,85	3,8	4,75	5,7	6,65	7,6
23	0,23	0,46	1,15	2,3	3,45	4,6	5,75	6,9	8,05	9,2
41	0,41	0,82	2,05	4,1	6,15	8,2	10,2	12,3	14,3	16,4
100	1	2	5	10	15	20	25	30	35	40
410	4,1	8,2	20,5	41	61,5	82	102	123	143	164

Tabela 6 - Matriz de Milankovitch modificada para os valores dos principais picos identifica-dos para o segmento N-570a (entre parênteses encontram-se os valores da matriz de Milankovitch).

m	33,30	7,83	6,34
33,30	1,00	4,25 (4,35)	5,25 (5,26)
7,83		1,00	1,23 (1,21)
6,34			1,00

Tabela 7 – Taxas de acumulação resultantes da associação dos ciclos sedimentares escolhidos com os períodos das variações orbitais (N-570a).

Espessura (m)	Período (ka)	Taxa de acumulação (cm/ka)
33,30	100	33,30
7,83	23	34,06
6,34	19	33,38

identificar os comprimentos de onda dominantes. Os valores obtidos foram utilizados na construção de uma matriz de correlação que foi comparada com a dos períodos dos ciclos de Milankovitch (Tabela 3), identificando-se as razões com grau de similaridade igual ou superior a 95%. A linha de evidência seguida por diversos autores para demonstrar o controle dos ciclos de Milankovitch sobre o registro sedimentar é a recorrência da razão entre ciclos correspondentes às que ocorrem entre os períodos de parâmetros orbitais de Milankovitch e cujos períodos calculados correspondam aproximadamente aos do parâmetro orbital em questão (Algeo & Wilkinson, 1988).

Em seguida, foram correlacionados os períodos orbitais com as espessuras dos ciclos para se obter a taxa de acumulação correspondente para cada comprimento de onda. Com base nas informações bioestratigráficas do poço, foram estimadas as taxas de sedimentação predominantes na área de estudo, supondo-se que eventos erosivos eventualmente presentes tenham sido de importância secundária. Embora essas taxas digam respeito a intervalos maiores que aos representados em cada segmento, elas servem de base para se fazer a opção pela taxa de sedimentação calculada. Foram identificados, então, os principais comprimentos de onda, relacionando-os com as taxas de acumulação para definir, assim, a duração de cada ciclo. Em seguida foram contados os ciclos e pela integração dos resultados obtidos em cada segmento, calculou-se o intervalo de tempo compreendido em toda a seção e comparou-se com os resultados de bioestratigrafia.

ANÁLISE DOS RESULTADOS A análise visual dos dados revela uma ciclicidade evidente do perfil sônico, com ciclos ora de mais alta, ora de mais baixa frequência. Essa alternância foi atribuída a oscilações na taxa de acumulação. Aparentemente, há uma tendência de diminuição das taxas de acumulação para o topo do poço. O perfil foi dividido de acordo com as faixas de sedimentação estimadas a partir da análise visual, respeitadas as biozonas.

No traço sísmico observa-se uma clara tendência nos dados com a profundidade. Com o aumento da profundidade, o sinal sofre cada vez mais a influência de eventos que concorrem para a perda da amplitude (divergência esférica, absorção de energia, partição de energia nas interfaces etc.). Acredita-se que este efeito tenha sido minimizado pela divisão das biozonas em segmentos. Embora a divisão seguida tenha sido a mesma estabelecida para o sônico (para permitir a comparação entre os dois tipos de dados), acredita-se que o efeito da tendência nos dados também foi minimizado.

As razões obtidas entre os picos mais significativos dos periodogramas de cada segmento em cada conjunto de dados foram comparadas com aquelas estabelecidas para os fenômenos orbitais por Milankovitch. Os picos com melhor correspondência foram selecionados e analisados quanto aos valores de taxa de acumulação associados. Desta análise tentou-se a associação dos ciclos identificados em cada segmento com os ciclos dos fenômenos orbitais, dentro de uma expectativa de taxa de acumulação compatível. A multiplicação do número de ciclos identificado no segmento pelo período do fenômeno orbital associado forneceu a duração em milhares de anos do segmento e, no somatório dos segmentos, das biozonas.

De acordo com a teoria da amostragem, um evento será adequadamente registrado por um processo se ao menos uma amostra for obtida a cada meio comprimento de onda do evento. Por outro lado, Schulz & Mudelsee (1997) afirmam que períodos com menos de dois ciclos inteiros devem ser considerados questionáveis. A resolução do sônico é de cerca de 0,60 m e pode ser calibrada por outros dados obtidos da perfuração do poço. A resolução sísmica está sujeita à influência de diversos

fatores que vão desde os parâmetros de aquisição e registro dos dados até características próprias do pulso sísmico e de cada meio atravessado. A estimativa da resolução temporal no método sísmico pode ser feita segundo diversos critérios. O mais aceito e utilizado na literatura é considerá-la a quarta parte do comprimento de onda do pulso sísmico.

Os espectros de frequência (figura 6) dos dados sísmicos mostram que as frequências dominantes situam-se em torno de 80, 50 e 85 Hz para as biozonas N-560, N-570 e N-580, respectivamente. O espectro da N-580 tem um aspecto polimodal, com picos em 25, 50 e 85 Hz; o espectro da N-570 também exibe um aspecto polimodal e, embora o pico dominante esteja em torno de 50 Hz, são vistos níveis significativos de energia até 90 Hz; o espectro da N-560, por sua vez, embora possua pico dominante em torno de 80 Hz, apresenta um espectro mais “comportado”. Isto pode significar um conteúdo total de frequência mais restrito.

A partir do sônico obtém-se valores de velocidades intervalares, respectivamente para as biozonas N-560, N-570 e N-580, de 2770, 2540 e 2180 m/s. As resoluções obtidas, considerando-se a resolução igual a um quarto do comprimento de onda dominante, estão na tabela 4.

A tabela 5 exibe, para um largo espectro de taxas de acumulação, as espessuras de sedimentos necessárias para que se registre ao menos um ciclo inteiro de cada fenômeno orbital.

Exemplificando a aplicação da metodologia de análise, tome-se o caso da Biozona N-570.

A biozona N-570 ocorre no poço entre as cotas 1994 e 2351 m, e sua duração é estimada em 1,2 Ma (Azevedo et alii, 1992). Assim, a taxa de acumulação média para a biozona, desconsiderando possíveis hiatos e intervalos erosivos, seria da ordem de 30 cm/ka. Esta biozona foi dividida em três segmentos: N-570a, N-570b e N-570c (Figura 7).

Segmento N-570a (2218 a 2351 m)

A curva do sônico apresenta-se bastante “serrilhada” com ciclos de várias amplitudes e comprimentos de onda (figura 8). Parecem predominar os ciclos com comprimento em torno de 5 m. O traço sísmico parece composto por um ciclo de aproximadamente 12 m, modulado por outro de mais longo período (em torno de 35 m).

A análise espectral e associação da matriz composta pelos seus valores mais significativos com a matriz de Milankovitch (tabela 6) sugerem que os picos em 0,006006 (33,30 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 9). Considerando-se estes valores, a taxa de acumulação seria de cerca de 33 cm/ka para o intervalo (tabela 7).

A partir das análises visual e da análise espectral, observa-se o predomínio do ciclo precessional com espessuras entre 5 e 8 m, devendo, a julgar pelo periodograma, predominar os ciclos com período em torno de 23 ka. A multiplicação do número de ciclos deste tipo presentes neste segmento (21) por uma duração média de 23 ka, produz uma duração de 483 ka para o intervalo. Na curva do sônico, em alguns pontos, este ciclo precessional parece modular ciclos com comprimento de onda menor, da ordem de 1 m. Há a possibilidade de que estes ciclos também correspondam à precessão longa, mas, por uma queda local na taxa de deposição, sua espessura não tenha se desenvolvido 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. Dividindo-se a espessura do segmento (133m) pela espessura do ciclo dominante identificado na análise serial (7,83 m), obtemos 17 ciclos, e uma duração de aproximadamente 390 ka para o segmento. A taxa média de acumulação seria de 34 cm/ka.

Figura 8 - Perfil sônico “espelhado” (a) e traço sísmico para o segmento N-570a.

Figura 9 - Análise espectral do sônico para o segmento N-570a.

Figura 10 - Análise espectral do traço sísmico para o segmento N-570a.

No espectro de frequência dos dados sísmicos (Figura 10) destacam-se os picos com 0,02381 (42 m), 0,39683 (25,2 m), 0,055556 (18 m) e 0,071429 ciclos/m (14 m). A resolução calcu-

Tabela 8 - Matriz de Milankovitch alterada para os valores dos principais picos identificados para o segmento N-570b (entre parênteses encontram-se os valores da matriz de Milankovitch).

m	40,50	16,19	9,52	7,71
40,5	1,00	2,50 (2,44)	4,25 (4,35)	5,25 (5,26)
16,1		1,00	1,70 (1,78)	2,09 (2,15)
9,52			1,00	1,23 (1,21)
7,71				1,00

Tabela 10 - Matriz de Milankovitch alterada para os valores dos principais picos identificados para o segmento N-570c (entre parênteses, os valores da matriz de Milankovitch)

m	20,66	8,85	5,16	4,42
20,66	1,00	2,33 (2,44)	4,00 (4,35)	4,67 (5,26)
8,85		1,00	1,71 (1,78)	2,00 (2,15)
5,16			1,00	1,16 (1,21)
4,42				1,00

Tabela 9 – Taxas de acumulação resultantes da associação dos ciclos sedimentares escolhidos com os períodos das variações orbitais (N-570b).

Espessura (m)	Período (ka)	Taxa de acumulação (cm/ka)
40,50	100	40,50
16,19	41	39,51
9,52	23	41,43
7,71	19	40,60

Tabela 11 – Taxas de acumulação resultantes da associação dos ciclos sedimentares escolhidos com os períodos das variações orbitais (N-570c).

Espessura (m)	Período (ka)	Taxa de acumulação (cm/ka)
20,66	100	20,66
8,85	41	21,60
5,16	23	22,46
4,42	19	23,30

Figura 11 - Perfil sônico "espelhado" (a) e traço sísmico para o segmento N-570b.

Tabela 12 – Duração total da biozona N-560, calculada a partir da cicloestratigrafia, distribuída nos segmentos em ordem decrescente de profundidade.

SEGMENTO	INTERVALO (m)	ESPESSURA (m)	DURAÇÃO (ka)	TAXA MÉDIA DE ACUMULAÇÃO (cm/ka)
N-560a	2530-2586	56	1060	5,3
N-560b	2499-2530	31	400	7,8
N-560c	2442-2499	57	449	12,7
N-560D	2351-2442	91	507	18
TOTAL	2586-2351	235	2416	9,73

lada para esta biozona foi de 12,7 m (tabela 4). Considerando-se a taxa de acumulação 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 ferramenta 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, para uma taxa de deposição ligeiramente menor do que aquela inferida a partir do sônico (25 cm/ka).

Segmento N-570b (2056 a 2218 m)

Na análise visual deste trecho do perfil sônico observam-se ciclos de até 10 m de espessura aparentemente modulando ciclos menores de até 1 m. No traço sísmico predomina, visualmente, o ciclo com cerca de 20 a 25 m de espessura (Figura 11).

No periodograma deste trecho do sônico destacam-se os picos em, 0,004938 (40,50 m), 0,012346 (16,20 m) e 0,020988 (9,53 m) ciclos/m (Figura 12). Através da associação das razões entre estas espessuras e a matriz de Milankovitch (tabela 8), pode-se associar estes picos, respectivamente, com os períodos de excentricidade curta (100 ka), obliquidade (41 ka) e precessão longa (23 ka). Com menos destaque no periodograma, mas pela boa correlação entre as matrizes, podemos associar o pico em 0,025926 ciclos/m (7,71 m) ao período da precessão curta (19 ka). Uma composição dos dois ciclos de precessão parece ser o que se observa na análise visual. Com estes valores, obteríamos uma taxa de acumulação de cerca de 40 cm/ka para o segmento (tabela 9).

Mais uma vez predomina o ciclo associado à precessão longa (23 ka) com cerca de 9 m de espessura. A multiplicação do número de ciclos presentes no segmento (20) pelo período de 23 ka produz uma duração de 460 ka para o intervalo. Dividindo-se a espessura do segmento (162 m) pelo ciclo dominante na análise serial (9,53 m), obtemos 17 ciclos e uma duração para o segmento de 391 ka para o segmento N-570b. A taxa média de acumulação seria de 41,4 cm/ka.

Figura 12 - Análise espectral do perfil sônico para o segmento N-570b.

Figura 13 - Análise espectral do traço sísmico para o segmento N-570b.

No espectro obtido a partir dos dados sísmicos para o segmento (figura 13) destacam-se os picos em 0,019481 (equivalente à espessura de 51,33 m), 0,038961 ciclos/m (25,67 m), 0,051948 (19,25 m), 0,071429 (14 m) e 0,084416 (11,85 m). Estes dois últimos, porém, estão no limite de resolução do método para o intervalo. Por comparação visual, conclui-se que há correspondência entre o ciclo com espessura em torno de 16 m, no sônico, e aquele com cerca de 19 m, no traço sísmico. Se o primeiro corresponde ao evento com período em torno de 41 ka (obliquidade), é natural acreditar que o segundo também o faça.

Segmento N-570c (1994 a 2056 m)

Na análise visual do segmento destacam-se os ciclos com cerca de 5 a 10 m, modulando eventos de menor espessura (cerca de 1 m). No traço sísmico predomina o ciclo com cerca de 15 m de espessura (Figura 14).

No periodograma deste trecho do perfil sônico (figura 15) destacam-se os picos em 0,003226 (equivalente a 62 m, a espessura total do segmento), 0,009677 (20,67 m), 0,016129 (12,40 m), 0,022581 (8,86 m) e 0,045161 (4,42 m) ciclos/m.

Desconsiderando-se o pico que representa a espessura total do segmento, e buscando-se as melhores correlações com a matriz de Milankovitch (tabela 10), chega-se às seguintes equivalências entre picos e períodos: (a) 0,009677 ciclos/m (20,67 m) - excentricidade curta (100 ka); (b) 0,022581 ciclos/m (8,86 m) - obliquidade (41 ka); (c) 0,038710 ciclos/m (5,16 m) - precessão longa (23 ka); e (d) 0,045161 ciclos/m (4,42 m) - precessão curta (figura 16). Com estes valores, obtém-se uma taxa

de acumulação de cerca de 22 cm/ka para o segmento (tabela 11).

Neste segmento, predomina o ciclo com espessura em torno de 9 m, associado à obliquidade. A multiplicação do número de ciclos presentes no segmento (9) por um período médio de 41 ka, produz uma duração de 369 ka para o intervalo. Na espessura do segmento (62 m) caberiam, na verdade, 7 ciclos com 8,85 m de espessura, e o segmento teria sido depositado em um tempo um pouco menor (287 ka). A taxa média de acumulação seria de 21,6 cm/ka.

No espectro obtido a partir dos dados sísmicos (figura 16) predominam os picos em 0,039474 (25,3 m) e 0,065789 (15,2 m). À esquerda no espectro pode-se observar o pico que equivale à espessura total do intervalo (0,0013158 ciclos/m, 76 m). Entre os ciclos identificados na análise espectral do sônico, apenas o ciclo de 100 ka possui resolução suficiente para, com esta taxa de acumulação, possibilitar seu registro pela sísmica. Se assumirmos que o ciclo com 25,3 m pode corresponder ao período de 100 ka, teríamos, pela sísmica, uma taxa de acumulação de 25,3 cm/ka no local do traço sísmico, um pouco superior, portanto à estimada a partir do sônico.

A mesma metodologia, aplicada a todos os segmentos das três biozonas, gerou os seguintes resultados:

Biozona N-560

No segmento N-560a, o mais basal, a sísmica mostrou-se capaz de identificar o ciclo de excentricidade com cerca de 410 ka; na comparação visual com o perfil sônico, de fato este ciclo parece ser a envoltória dos ciclos com 100 ka. Estes possuem espessura em torno de 5,0 m, estando, assim, abaixo da melhor expectativa de resolução dos dados sísmicos para o segmento (cerca de 8,5 m tabela 4). O sônico identificou ainda os ciclos de 19, 23, 41, além do de 100 ka. Pela associação entre as razões de espessuras calculadas e a matriz de Milankovitch, concluiu-se que a taxa de acumulação para este primeiro segmento foi de 5,3 cm/ka, e que a deposição deu-se no intervalo de aproximadamente 1060 ka.

No segmento N-560b, através do sônico foi possível, por associação com a matriz de Milankovitch, identificar os eventos com períodos de 19 ou 23 ka (mais provavelmente o primeiro), de 41 ka e de 100 ka. A taxa de acumulação foi de cerca de 7,5 cm/ka e a deposição teria ocorrido ao longo de cerca de 400 ka. Desta vez, destaca-se a importância do ciclo relacionado à obliquidade na composição da curva do sônico. Na sísmica não foi possível identificar nenhum pico geologicamente significativo, embora teoricamente houvesse resolução para que, como no segmento anterior, fosse identificado o ciclo com 410 ka de período. O ciclo de 100 ka, com espessura em torno de 7,8 m estaria abaixo da resolução do método para a biozona (tabela 4). Porém, também no sônico foi impossível identificar este ciclo maior. O problema é que, considerando a taxa de acumulação de 7,5 cm/ka, o ciclo de 410 ka teria cerca de 32 m de espessura, o que é mais do que a espessura total do segmento (31 m).

No segmento N-560c, através da análise espectral do sônico foi possível identificar os ciclos de 19, 23, 41 e 100 ka, remetendo a uma taxa de 13 cm/ka para o intervalo. O segmento inteiro teria sido depositado em cerca de 450 ka, e a precessão parece ter voltado a exercer maior influência sobre a deposição. Na análise do traço sísmico, sobressai o ciclo com cerca de 16 m, que, por comparação visual, parece ser equivalente ao de cerca de 13 m na curva do perfil sônico, possuindo, assim como este, período de 100 ka. Aqui, a sísmica conseguiu identificar um ciclo com período menor devido ao aumento na taxa de acumulação.

No segmento N-560d, por fim, é possível identificar pela análise do sônico os ciclos de 19, 23 e 41 ka, com predomínio do de 23 ka (período longo da precessão), com espessuras que sugerem uma taxa de acumulação de cerca de 18 cm/ka e uma

duração total para o segmento de cerca de 507 ka. No periodograma da sísmica foi possível identificar dois ciclos com 22,5 e 45 m, mas não foi possível associá-los a nenhum ciclo por comparação com os valores da curva do sônico. Como o traço sísmico e o poço não são perfeitamente coincidentes no espaço, é possível que fatores locais possam ser responsáveis por esta diferença. Para que o ciclo com 22,5 m por exemplo, fosse equivalente ao período de 100, seria necessário que a taxa de acumulação fosse da ordem de 22,5 cm/ka. Caso este ciclo represente a periodicidade de 410 ka, a taxa deveria ser de cerca de 5,5 cm/ka. Para que o mesmo se desse com o ciclo de 44,5 m, a taxa de acumulação deveria ser de 44,5 cm/ka e 11 cm/ka, respectivamente. Assim, se os picos identificados na sísmica representarem efetivamente fenômenos cíclicos orbitais, o mais provável é que o ciclo com 22,5 m de espessura corresponda ao evento com período de 100 ka e que a taxa de acumulação para a posição do traço sísmico seja um pouco superior àquela para a posição do poço. A taxa de 44,5 cm/ka parece excessiva dentro deste contexto e, as demais, muito baixas, por comparação com os segmentos anteriores.

Assim, com base na cicloestratigrafia, a sedimentação do intervalo compreendido entre os topos das biozonas N-560 e N-570 ocorreu ao longo de cerca de 2,4 Ma, com taxas que variaram de cerca de 5 cm/ka no segmento mais basal, a cerca de 18 cm/ka no segmento mais novo. A precessão parece ter sido o fenômeno orbital mais influente na deposição. A distribuição da duração total da biozona encontra-se disposta na tabela 12.

Estes valores estão cerca de 40% acima do estabelecido pela bioestratigrafia (1,5 Ma., Azevedo et alii, 1992). A taxa média de deposição calculada a partir dos dados da bioestratigrafia e de espessura do intervalo no poço seria de cerca de 15,6 cm/ka.

Biozona N-570

No segmento N-570a, a análise serial da curva do sônico permitiu a identificação de ciclos com períodos de 100, 23 e 19 ka. A taxa de acumulação foi estimada em cerca de 34 cm/ka, tendo o segmento sido depositado em cerca de 390 ka, sob predomínio da precessão. Na análise do traço sísmico foi identificado 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 se distinguir o ciclo com período de 100 ka, que no sônico possui cerca de 33,3 m de espessura. Os demais ficariam abaixo do poder de resolução sísmica. Se aquele ciclo com 21 m de espessura for equivalente ao de 100 ka de período, isto significaria que a taxa de acumulação, na posição geográfica do traço sísmico, seria de 21 cm/ka, sendo assim um pouco inferior à verificada no poço (a distância entre os dois pontos é de quase 3 km).

No segmento N-570b foram identificados, pela análise serial do sônico, os ciclos associados aos períodos de 100 ka, 41 ka, 19 e 23 ka. A taxa de acumulação seria da ordem de 40 cm/ka, e o segmento ter-se-ia depositado ao longo de cerca de 391 anos. Novamente os ciclos relacionados com a precessão parecem predominar na composição deste trecho da curva do sônico. Na análise do traço sísmico destaca-se o ciclo com 19 m de espessura, provavelmente relacionado com o período da obliquidade (41 ka). A identificação de um ciclo com um período relativamente curto foi possível graças ao incremento na taxa de acumulação, que suplantou, inclusive, a resolução relativamente mais baixa dos dados sísmicos nesta biozona (12,70 m). Contudo, esta mesma resolução impediu que os ciclos precessionais fossem distinguidos na análise espectral do traço sísmico. Estranhamente, 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.

Por fim, no segmento N-570c, a análise serial do sônico per-

Figura 14 - Perfil sônico "espelhado" (a) e traço sísmico (b) para o segmento N-570c.

Tabela 13 – Duração* total da biozona, calculada a partir da cicloestratigrafia, distribuída nos segmentos em ordem decrescente de profundidade.

SEGMENTO	INTERVALO (m)	ESPESSURA (m)	DURAÇÃO (ka)	TAXA MÉDIA DE ACUMULAÇÃO (cm/ka)
N-570a	2218 - 2351	133	390	34
N-570b	2056 - 2218	162	391	41,4
N-570c	1994 - 2056	62	287	21,6
TOTAL	2351 - 2056	295	1068	27,62

Tabela 14 – Duração total da biozona, calculada a partir da cicloestratigrafia, distribuída nos segmentos em ordem decrescente de profundidade.

SEGMENTO	INTERVAL O (m)	ESPESSUR A (m)	DURAÇ ÃO (ka)	TAXA MÉDIA DE ACUMULAÇÃO (cm/ka)
N-580a	1896 - 1994	98	369	26,56
N-580b	1764 - 1896	132	478	26,83
N-580c1	1736 - 1764	28	369	7,6
N-580c2	1722 - 1736	14	300	4,7
N-580c3	1697 - 1722	25	400	6,25
N-580c4	1659 - 1697	38	276	13,8
TOTAL	1659 - 1994	335	2192	15,28

mitiu distinguir os ciclos com períodos de 100, 41, 23 e 19 ka. A taxa de acumulação seria da ordem de 22 cm/ka, e o segmento teria sido depositado em um intervalo de tempo total de 287 ka. Desta vez, destacou-se o ciclo relacionado ao período da obliquidade na análise espectral. Na análise do traço sísmico, destacou-se um ciclo com 19 m de espessura. Com base na resolução sísmica calculada para a biozona, estima-se que apenas o ciclo de 100 ka poderia ser registrado através do método sísmico, com a taxa de acumulação calculada para o segmento. De fato, é possível que este ciclo com 19 m de espessura e aquele

Figura 15 - Análise espectral do perfil sônico para o segmento N-570c.

identificado no sônico para o período de 100 ka (20 m) sejam equivalentes e associados ao mesmo fenômeno.

Assim, com base na cicloestratigrafia feita a partir da curva do sônico, estimou-se que a seção compreendida entre os topos das biozonas N-570 e N-560 tenha sido depositado ao longo de cerca de 1,25 Ma. O fenômeno orbital mais importante na composição da curva do perfil sônico, mais uma vez, foi a precessão. A distribuição da duração de cada segmento, bem como de suas taxas de acumulação associadas encontram-se na tabela 13.

Os dados de bioestratigrafia associados aos valores de espessura do intervalo no poço indicam uma duração total da biozona de cerca de 1,2 Ma, com taxa média de deposição da ordem de 30 cm/ka. O resultado obtido a partir da cicloestratigrafia difere assim em quase 15% do obtido pela bioestratigrafia.

Biozona N-580

No segmento N-580a, embora o sônico tenha identificado ciclos que podem estar associados aos períodos de 19, 23 e 41 ka, não foi possível, através da análise serial do traço sísmico, distinguir os mesmos eventos. Apenas o ciclo com 15 m parece, através da análise visual, corresponder à obliquidade (41 ka). Porém, a sua associação àquele fenômeno resultaria na admissão de uma taxa de acumulação de cerca de 35 cm/ka, muito superior à calculada através da análise serial do sônico (aproximadamente 27 cm/ka). Tomando-se o ciclo dominante na composição da curva entre aqueles representativos de algum fenômeno orbital, podemos dizer que a obliquidade foi o fator preponderante. A deposição do segmento deu-se ao longo de 369 ka.

No segmento N-580b, através do sônico foi possível, mais uma vez por associação com a matriz de Milankovitch, identificar os eventos com períodos 19, 23 e 41 ka. A taxa de acumulação foi de cerca de 27 cm/ka e a deposição teria ocorrido ao longo de cerca de 492 ka. Novamente o ciclo associado à obliquidade se destaca na composição da curva do sônico. Na sísmica, desta vez, foi possível identificar ciclos com 13 e 32,5 m que parecem corresponder, respectivamente, aos períodos de 41 e 100 ka, remetendo, entretanto, a uma taxa de acumulação de aproximadamente 32 cm/ka, um pouco maior do que a calculada a partir do sônico. Os ciclos precessionais possuem espessuras que ficam abaixo do poder de resolução do método sísmico para a biozona (aproximadamente 6,5 m).

O segmento N-580c foi subdividido em segmentos menores com taxas de acumulação diferenciadas. No subsegmento N-580c1 foram identificados ciclos associados aos eventos com períodos de 100, 41 e 23 ka, a taxa de acumulação calculada foi de 7,6 cm/ka e o tempo de deposição do subsegmento foi de aproximadamente 369 ka; no subsegmento N-580c2 observou-

Figura 16 - Análise espectral do traço sísmico para o segmento N-570c.

se mais uma vez a contribuição dos ciclos com 100, 41 e 23 ka na composição da curva, mas desta vez a taxa de acumulação ficou em cerca de 4,7 cm/ka, remetendo a uma duração deste subintervalo em torno de 300 ka; a análise do subsegmento N-580c3 revelou novamente a influência de ciclos com 100, 41 e 23 ka de período, remontando a uma taxa média de acumulação em torno de 6,25 cm/ka ao longo de 400 ka de deposição; finalmente, no subsegmento N-580c4 também observou-se a presença de ciclos com períodos de 100, 41 e 23 ka, desta vez com uma taxa média de acumulação de 13,8 cm/ka ao longo de 276 ka de deposição. Os ciclos identificados na análise do perfil possuem, em sua ampla maioria, espessuras abaixo da resolução esperada para o método sísmico na biozona N-580 (6,5 m). O único ciclo que escapa a esta regra é aquele com 100 ka de período e 12, 67 m de espessura observado no subsegmento N-580c4, fruto do incremento na taxa de acumulação em relação aos subsegmentos anteriores. É razoável assumir que o ciclo com 18 m identificado na análise espectral do traço sísmico, então, corresponda àquele período (100 ka), e que, localmente, na posição geográfica deste traço, a taxa de acumulação seja de 18 cm/ka, isto é, um pouco superior à observada no sônico.

Em suma, com base na cicloestratigrafia, a sedimentação do intervalo compreendido entre o topo da biozona N-570 e o topo da biozona N-580 ocorreu ao longo de cerca de 1,3 Ma, com taxas que variaram de cerca de 27 cm/ka nos segmentos basal e intermediário, até cerca de 18 cm/ka no segmento mais superior. O fenômeno orbital com maior influência sobre a sedimentação nesta biozona parece ser, diferentemente das biozonas anteriores, a obliquidade. A distribuição da duração total da biozona e das taxas de acumulação associadas encontram-se na tabela 14.

Os dados da bioestratigrafia associados aos dados de espessura do intervalo no poço indicam uma duração de cerca de 1,8 Ma para esta biozona com taxa de acumulação de 19 cm/ka. A cicloestratigrafia encontrou, assim valores cerca de 20 % acima dos determinados por bioestratigrafia.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS A utilização de dados sísmicos em estudos cicloestratigráficos mostrou-se viável dentro de certas condições e se tomados alguns cuidados. O método sísmico é um método indireto de investigação do subsolo sujeito a vários condicionantes instrumentais e ambientais e a sua utilização pressupõe a existência de pontos de controle (poços e, em casos específicos, os afloramentos). O ideal é utilizar-se mais traços sísmicos e mais pontos de controle, e preferencialmente, que os traços sísmicos se localizem o mais próximo possível dos pontos para que fatores locais não prejudiquem a associação entre os dados, como pode ter sido o caso em alguns segmentos

analisados. A viabilidade da utilização da sísmica na cicloestratigrafia aumenta com o incremento da resolução temporal e da taxa de acumulação. Ela estará maximizada se utilizarmos equipamentos que garantam a geração (fontes sísmicas apropriadas), captação (receptores que não discriminem as altas frequências) e registro (filtros apropriados, razão de amostragem adequada no processo de digitalização) de um amplo conteúdo de frequências, em um ambiente em que as taxas de acumulação tenham permitido que os ciclos sob investigação alcancem espessuras superiores a duas vezes o poder de resolução da sísmica.

Por outro lado, deve-se lembrar que o método sísmico registra variações na impedância acústica das rochas. Só se podem esperar resultados positivos na utilização da sísmica nos estudos de ciclicidade onde esta se manifeste através de alternâncias naquela característica física. Ambientes em que a ciclicidade se revele por variações nas proporções de isótopos, ou conteúdo de carbono orgânico, etc, não são os naturalmente propícios para a utilização da sísmica em cicloestratigrafia, a menos que estas características venham acompanhadas de mudanças nas propriedades físicas que definem a impedância acústica (velocidade intervalar e densidade).

Nos dados utilizados, a ciclicidade está relacionada com a alternância entre margas e folhelhos calcíferos. O conteúdo de carbonato influencia a velocidade intervalar e a densidade das rochas. A utilização de dados sísmicos com um conteúdo de frequências superior ao utilizado na indústria permitiu uma resolução nominal que variou de 6,5 a 12,7 m ao longo do traço sísmico. A identificação dos ciclos de Milankovitch ficou condicionada à resolução efetiva dos dados (que diverge da calculada matematicamente, por fatores locais ao longo do traço) e à taxa de acumulação do intervalo. Esta, variou de cerca de 5,3 cm/ka no segmento N-560a, até cerca de 40 cm/ka na N-570b.

A duração do tempo calculada para os intervalos diferiu da fornecida por bioestratigrafia. Isto pode estar associado à própria metodologia de análise bioestratigráfica utilizada, na qual foi obtida uma amostra a cada 18 m perfurado. Esta amostragem pode ter sido, por exemplo, responsável pela incapacidade de se determinar a posição do topo da biozona N-560, que foi estabelecida por correlação com outros poços da área (Souza Cruz, 1995).

Com estes condicionantes foi possível, com a sísmica, vivenciar três situações:

(a) No intervalo entre os topos das biozonas N-560 e N-550, que possui resolução sísmica nominal de 8,5 m, foi possível identificar basicamente os ciclos com período de 100 ka, que, porém, só foram discerníveis quando a taxa de acumulação aumentou para cerca de 12 cm/ka ou mais. Foi identificado, no segmento mais basal, o período longo de excentricidade de 410 ka. Esta foi a única situação em que foi possível associar um ciclo a este período. Isto se deve à maior duração temporal contida nesse intervalo (cerca de 960 ka). Os demais segmentos têm todos duração em torno de 400 ka, isto é, praticamente igualando o período daquele ciclo.

(b) Entre os topos das biozonas N-570 e N-560 (resolução sísmica nominal de 12,7 cm/ka) foi possível, outra vez, identificar ciclos com período de 100 ka. Quando a taxa de deposição atinge seu máximo (40 cm/ka na 570b), pode-se identificar o ciclo com cerca de 41 ka.

(c) No intervalo limitado pelos topos das biozonas N-580 e N-570, a resolução sísmica nominal de 6,5 m associada a uma taxa de acumulação que variou de 4,7 a 27 cm/ka, permitiu que com os dados sísmicos fosse possível identificar ciclos candidatos a uma associação com os períodos de 41 e 100 ka, o primeiro, naturalmente, naqueles segmentos em que a taxa de acumulação foi máxima.

CONCLUSÕES A sucessão sedimentar estudada apresenta uma clara alternância rítmica entre folhelhos e margas, evidenciada nos perfis, na descrição litológica do poço e no aspecto geral da seção sísmica (alternância de sismofácies). A ciclicidade nesta última ferramenta fica mais evidente para as porções mais rasas em virtude da perda de resolução da sísmica com a profundidade. Acreditamos que a ritmicidade está associada a fatores orbitais, como já demonstrado, por outros autores, para o mesmo intervalo de tempo (Mioceno) nesta e em outras bacias.

Foi possível através da análise espectral do perfil sônico a caracterização de ciclos associados à excentricidade (410 e 100 ka), obliquidade (41 ka) e precessão (23 e 19 ka). O fenômeno de maior influência sobre a ritmicidade da deposição dos sedimentos parece ter sido a precessão, exceto para os sedimentos depositados no intervalo entre os topos das biozonas N-570 e N-580, onde predomina a obliquidade. A análise espectral do traço sísmico coincidente com a projeção da posição do poço sobre a seção sísmica possibilitou a identificação de ciclos, em geral, com cerca de 100 ka. Onde o intervalo era suficientemente longo, apesar da baixa taxa de acumulação, foi possível identificar também o ciclo associado ao período de 410 ka (N-560a). Quando há um incremento relevante na taxa de sedimentação, é possível associar ciclos até ao período de 41 ka (N-570b, apesar da relativamente baixa resolução, 12,7 m).

A razão para esta diferença no conteúdo de frequências observado em cada conjunto de dados é a própria diferença de resoluções possíveis de serem atingidas com cada ferramenta. A resolução dos perfis de poço em geral é da ordem de 60 cm, enquanto a sísmica, mesmo nesta área de excelente qualidade e com conteúdo de frequências mais alto que o da sísmica convencional, alcança, no máximo, 6,5 m, no intervalo de estudo (ou seja, dez vezes menor). O meio de contornar essa limitação seria a aquisição de dados sísmicos com conteúdo de frequências mais próximo ao dos perfis, o que, é inviável no atual estágio de desenvolvimento tecnológico do método, para as profundidades investigadas, devido ao efeito discriminante que o solo exerce sobre as ondas sísmicas (absorção). A ideal obtenção de resoluções sísmicas aproximadas às dos perfis no futuro, propiciaria multiplicar as informações pontuais dos poços pelas grandes áreas cobertas pelos levantamentos sísmicos a um custo significativamente menor, produzindo um refinamento cronoestratigráfico, e, conseqüentemente, um maior entendimento da influência dos fenômenos orbitais sobre a sedimentação no planeta ao longo do tempo. A aplicação desta técnica em um levantamento 3D, por exemplo, forneceria uma visão tridimensional da influência dos fenômenos orbitais sobre a sedimentação da área.

O potencial de utilização da sísmica no refinamento estratigráfico através da cicloestratigrafia é muito bom. Para viabilizar essa nova utilização da sísmica, algumas premissas, todas ligadas ao aumento da resolução, precisam ser alcançadas: (a) o horizonte investigado suficientemente raso para minimizar o efeito filtrante de altas frequências do solo; (b) taxas de sedimentação relativamente altas, que contornem deficiências no conteúdo de frequências. Quanto mais a premissa (1) for violada, mais a premissa (2) precisa ser verdadeira; (c) aquisição sísmica com parâmetros que visem a recuperação do maior conteúdo de altas frequências possível; e (d) o intervalo a ser investigado com seus limites cronoestratigráficos bem controlados.

Referências

- Al-Chalabi, M. 1974. An analysis of stacking, rms, average, and interval velocities over a horizontally layered ground. *Geophysical Prospecting*, n.º 22, p: 458-475.
- 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, p: 313-322.
- Arthur, M.A. & Dean, 1991. An holistic approach to cyclomania: examples from Cretaceous pelagic limestone sequences. In: Einsele, G., Ricken, W. & Seilacher, A.(eds). *Cycles and Events in Stratigraphy*. Berlin:Springer-Verlag. Pp: 126-166.
- 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, p: 585-586.
- Azevedo, R. L (Coord.), Shimabukuro, S., Arai M., Uesugui, N. & Telles, A. S. 1992 - Bacia De Campos. In: Beurlen, G. (Coord., Ed.), 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. Texto Explicativo das Cartas Bioestratigráficas. Volume I: Bacias de Pelotas a Sergipe-Alagoas. PETROBRAS/CENPES/SUPEP/DIVEX/SEBIPE. *Relatório Interno*, p 79-137.
- Berger, A. L. 1988. Milankovitch theory and climate. *Reviews of Geophysics*, v.26 n.º 4, p: 624-657.
- De Boer, P.L. & Smith, D.G. 1994. Orbital forcing and cyclic sequences. In: De Boer, P.L., Smith, D.G. (eds.). *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*. Oxford:Blackwell, IAS, p: 1-14.(Special Publication 19)
- Dias, J.L., Scarton, J.C., Esteves, F.R., Carminatti, M. & Guardado, L. R. 1990. Aspectos da evolução tectono-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos. In: Raja Gabaglia, G. P. & Milani, E. J. (eds.). *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro:PETROBRÁS. p: 330-360.
- Grützner, J., Bassinot, F.C & Mienert, J. 1997. *High resolution compressional-wave velocity measurements in Pleistocene sediments of the Ceara Rise (Western Equatorial Atlantic): implications for orbital driven sedimentary cycles*. In: Shackleton, N.j., Curry, W.b., Richter, C. & Bralower, T.j. (Eds.). *Proc. ODP, Sci. Results*, 154: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Haq, B.U., Hardenbol, J. & Vail, P.R. 1988. Mesozoic and cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. In: Sea Level Changes: an integrated approach. Tulsa: *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*. p:71-108. (SEPM Special Publication, 42).
- Hays, J.D., Imbrie, J. & Shackleton, N.J. 1976. Variations in the Earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, v. 194, p: 1121-1132.
- Kowsmann, R. O. & Viana, A. R. 1992. Movimentos de massa provocados por cunhas progradantes de nível de mar baixo: exemplo na Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. v. 6, n.º 1/2, p.: 99-102. Petrobrás.Rio de Janeiro.
- Kuhnt, W., Nederbragt, A. & Leine, L. 1997. Cyclicality of Cenomanian-Turonian organic-carbon-rich sediments in the Tarfaya Atlantic Coastal Basin (Morocco). *Cretaceous Research*, n.º 18, 587-601.
- Meltzer, A.S. 1997. Cyclostratigraphy in the Triassic Newark Rift Basin. http://www.lehigh.edu/~asm3/triassic_basin.html (10/08/1998).
- Oliveira, C.H.B., Castro, D.D., Siriani, J.C., Guimarães, M.A.G. & Lengler, R.L. 1992. Programa Sísmico Digital Multicanal de Alta Resolução na Bacia de Campos. *Informe Geofísico n.º 96*. 10 p. Petrobrás/Getag (Publicação de circulação restrita).
- Pepper, T. & Cloething, S. 1995. Autocyclic perturbations of orbitally forced signals in the sedimentary record. *Geology*. v. 23, n.º 10, p.: 937-940.
- Pittet, B. & Strasser, A. 1998. Long-distance correlations by sequence stratigraphy and cyclostratigraphy: examples and implications (Oxfordian from the Swiss Jura, Spain, and Normandy). *Geol. Rundsch.*, n.º 86, p. 852-874.
- Posamentier, H.W. & Vail, P.R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition II - sequence and system tracts models. In: Sea level changes: na integrated approach. Tulsa: *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*. p: 125-154. (SEPM Special Publication, 42).
- Rangel, H.D.; Martins, F.A .L.; Esteves, F.R. & Feijó, F.J. 1994. Bacia de Campos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, n.º 1, v. 8, p: 203-217.
- 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, p: 860-861.
- Smith, D.G. 1994. Cyclicality or chaos? Orbital forcing versus non-linear dynamics. In: de boer, p.L., Smith, D.G. (eds.). *Orbital Forcing and Cyclic Sequences*. Oxford:Blackwell, IAS, pp: 531-544.(Special Publication 19).
- Souza Cruz, C.E. 1995. *Estratigrafia e sedimentação de águas profundas do Neogeno da Bacia de Campos, Estado do Rio de Janeiro, Brasil*. Tese de Doutorado, UFRGS, Instituto de Geociências, Porto Alegre. 186 pp.
- Sprenger, A. & Ten Kate, W.G. 1993a. Orbital forcing of calcilutite-marls cycles in southeast Spain and an estimate for the duration of the Berriasian stage. *Geological Society of America Bulletin*, v. 105, p. 807-818.
- Sprenger, A. & Ten Kate, W.G. 1993b. Cross-espectral analysis of two Berriasian rhythmic limestone-marls successions in SE Spain and SE France favours orbital control. *Geologie en Mijnbouw*, n.º 72, p. 69-83.