

# **APLICAÇÃO DOS DADOS ISOTÓPICOS DE CARBONO E OXIGÊNIO, DE ROCHA-TOTAL, EM ESTUDOS PALEOAMBIENTAIS**

## **APPLICATION OF CARBON AND OXYGEN ISOTOPE DATA FROM BULK SAMPLES TO STRATIGRAPHIC AND PALEOENVIRONMENTAL STUDIES**

## **APLICACIÓN DE LOS DATOS ISOTÓPICOS DE CARBONO Y OXÍGENO, DE ROCA TOTAL, EN ESTUDIOS PALEOAMBIENTALES**

Ricardo Latgé Milward de Azevedo<sup>1</sup>  
René Rodrigues<sup>2</sup>  
Tikae Takaki<sup>3</sup>

### **RESUMO**

Selecionou-se uma seção do Quaternário da Bacia de Campos para testar a consistência dos resultados isotópicos de oxigênio e carbono ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{13}\text{C}$ ) em rocha-total. Os valores foram comparados aos obtidos em carapaças de foraminíferos bentônicos e planctônicos. Apesar das limitações inerentes à rocha-total, os resultados demonstram a aplicabilidade de análises isotópicas em amostras como estas. Como vantagens da aplicação deste método, tem-se necessidade de menos investimentos e tempo em laboratório. As curvas isotópicas construídas para a seção da Bacia de Campos também foram comparadas aos resultados de um poço do *Ocean Drilling Program*, perfurado no Pacífico Equatorial, que amostrou seção quaternária. A equivalência verificada entre elas reafirma o significado estratigráfico dos resultados isotópicos e permite inferir sobre as condições paleoceanográficas nos últimos 40 000 anos. (Originais recebidos em 18.11.96.)

### **ABSTRACT**

*The usefulness of oxygen and carbon stable ( $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$ ) isotopes from bulk samples has been evaluated in a Quaternary section of the Campos Basin. Comparisons were made with values found in benthic and planktonic foraminifers. There are limits inherent to bulk samples but, results suggest that isotopic studies are applicable in such samples. This method has the advantage of being less expensive and time-consuming. The isotopic curves for the Campos Basin section were compared with a Quaternary section data of the Ocean Drilling Program, which were drilled in the equatorial Pacific. The curves are equivalent and prove the stratigraphic meaning of isotopic results, allowing conclusions to be drawn about the paleoceanographic conditions during the last 40,000 years. (Expanded abstract available at the end of the paper.)*

<sup>1</sup> Setor de Bioestratigrafia e Paleoecologia (SEBIPE), Divisão de Exploração (DIVEX), Centro de Pesquisas (CENPES), Avenida 1, Quadra 7, Cidade Universitária, CEP 21949-900, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
e-mail: rlma@if.ufrgs.br

<sup>2</sup> Setor de Bioestratigrafia e Paleoecologia (SEBIPE), Divisão de Exploração (DIVEX), Centro de Pesquisas (CENPES), Avenida 1, Quadra 7, Cidade Universitária, CEP 21949-900, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
e-mail: rene@cenpes.petrobras.com.br

<sup>3</sup> Setor de Geoquímica (SEGEQ), Divisão de Exploração (DIVEX), Centro de Pesquisas (CENPES), Avenida 1, Quadra 7, Cidade Universitária, CEP 21949-900, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
e-mail: tikae@cenpes.petrobras.com.br

*Se ha seleccionado una sección del Cuaternario de la Cuenca de Campos para probar la consistencia de los resultados isotópicos de oxígeno y carbono ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{13}\text{C}$ ) en roca-total. Los valores fueron comparados a los obtenidos en carapachas de foraminíferos bentónicos y planctónicos. A pesar de las limitaciones inherentes a la roca-total, los resultados demuestran la aplicabilidad de análisis isotópicos en muestras como estas. Como ventajas de la aplicación de este método, se tiene una menor necesidad de inversiones y tiempo laboratorial. Las curvas isotópicas construidas para la sección de la Cuenca de Campos también fueron comparadas a los resultados de un pozo del Ocean Drilling Program, perforado en el Pacífico Ecuatorial, que mostró sección cuaternaria. La equivalencia verificada entre ellas reafirma el significado estratigráfico de los resultados isotópicos y permite tejer inferencias sobre las condiciones paleoceanográficas en los últimos 40.000 años.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Emiliani (1955) foi o primeiro a utilizar isótopos estáveis como ferramenta estratigráfica, comparando seções do Quaternário e empregando valores de  $\delta^{18}\text{O}$  medidos em testas de foraminíferos. Apesar de exigirem procedimentos metodológicos bem mais simples, as primeiras pesquisas estratigráficas apoiadas na razão isotópica de carbono e oxigênio medidas na fração carbonática da rocha-total só foram publicadas na década seguinte. O uso em estudos isotópicos não parecia aconselhável, considerando-se a natureza variada deste material – carapaças dos mais diferentes organismos, secretadas em condições ecológicas diferentes (a temperatura em que vivem foraminíferos planctônicos e bentônicos, por exemplo), micrita e/ou carbonatos de origem diagenética.

Entretanto, exames em seções de várias bacias sedimentares (Rodrigues, 1978, Takaki, 1984; Takaki e Rodrigues, 1986; Rodrigues e Takaki, 1987; Azevedo, 1995 e Shackleton e Hall, 1995) vêm demonstrando a consistência das respostas de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{13}\text{C}$  e a viabilidade de utilização em estratigrafia e interpretação paleoambiental. Shackleton *et al.* (1993) reconhecem a possibilidade de alcançar alta resolução estratigráfica medindo valores de  $\delta^{18}\text{O}$  em amostras do tipo rocha-total, em seção do Quaternário. Foram, no entanto, mais reticentes com relação aos isótopos de carbono.

Por representar um valor médio entre os carbonatos produzidos no meio marinho, podendo ainda estar alterado por processos diagenéticos, não resta dúvida de que o sinal medido em rocha-total não tem a precisão de exames em carapaças de organismos, exigindo cuidados no seu uso. Entretanto, os resultados são compensadores, ponderando-se a redução significativa no tempo e nos custos laboratoriais que propicia (evita-se a preparação e triagem de fósseis).

Procurando avaliar o grau de consistência dos dados isotópicos, foram comparados os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{13}\text{C}$  em testas de foraminíferos e em rocha-total, obtidos em testemunho a pistão que amostrou a seção quaternária, no talude da Bacia de Campos. Os resultados foram posteriormente comparados aos de um poço do *Ocean Drilling Program*, perfurado no Pacífico equatorial, que também amostrou seção quaternária.

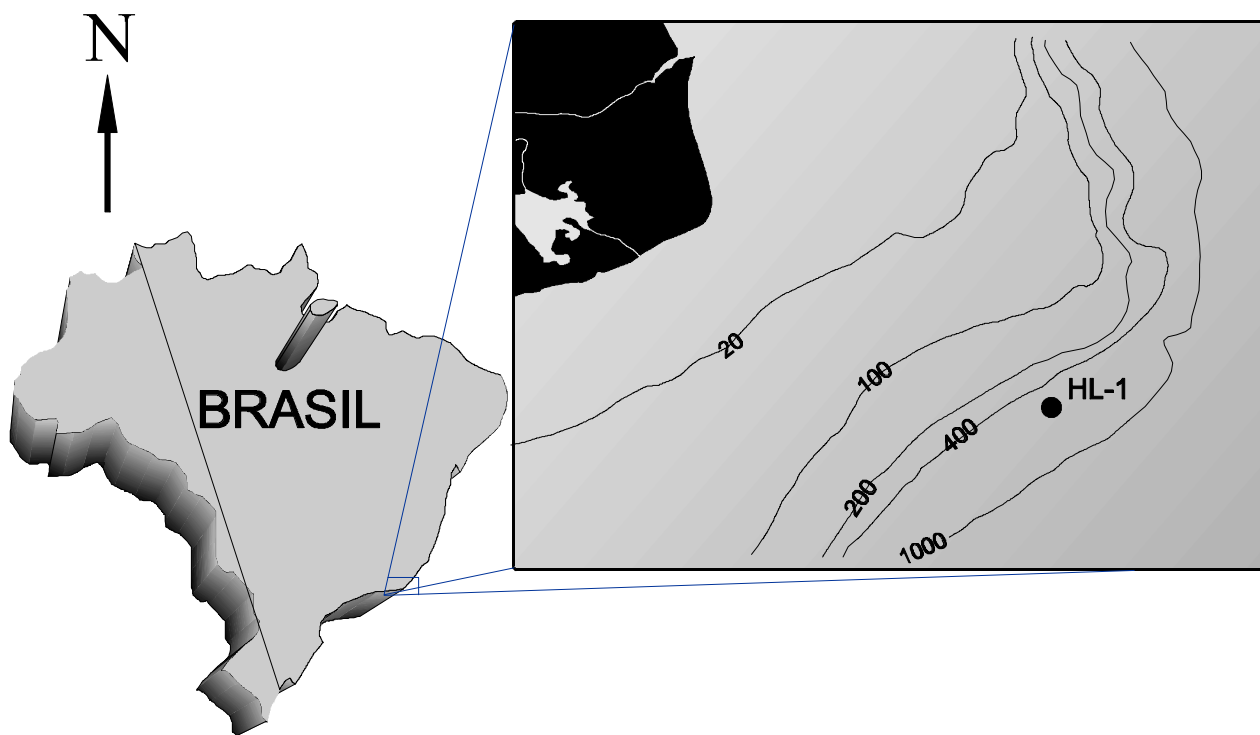
## **2. CONSIDERAÇÕES GEOLÓGICAS E METODOLÓGICAS**

A Bacia de Campos situa-se na margem sudeste da plataforma continental brasileira (fig. 1), tendo como limite geográfico setentrional o Arco de Vitória, e meridional o de Cabo Frio.

A seção selecionada para estudo foi um testemunho a pistão que amostrou 4,4 m e cortou a seção quaternária na região do Campo de Marlim, sob lâmina d'água de 686 m. O testemunho faz parte de projeto de avaliação da estabilidade do talude da Bacia de Campos, criado pela Comissão Interdepartamental de Águas Profundas (CIAP) da PETROBRAS (CENPES, SEGEN e E&P).

Sob o aspecto faciológico, os sedimentos são constituídos principalmente de lamias de colorações de cinza-oliva a esverdeada, com sinais de bioturbação ( fácies Loh e Lce, de Caddah, 1991).

No topo do testemunho, ocorre a fácies Alm (Caddah, *op. cit.*). Na figura 2, mostra-se a sucessão sedimentar do testemunho analisado.



**Fig. 1** - Mapa de localização da Bacia de Campos e do poço HL-1.  
**Fig. 1** - Campos Basin and well HL-1 location map.

Os dados isotópicos de oxigênio e carbono foram obtidos em 18 diferentes pontos da seção, tanto para a fração carbonática em rocha-total, como em carapaças de foraminíferos planctônicos e bentônicos. Para o mesmo tipo de análise, também foi selecionada uma amostra, onde procedeu-se uma concentração de nanofósseis.

As espécies planctônicas escolhidas – *Globigerinoides ruber* e *Globigerinoides sacculifer* – vivem nas partes mais superficiais da coluna d’água. Por este motivo, são bastante sensíveis às variações climáticas (Emiliani, 1954). Seus valores isotópicos de oxigênio têm boa correlação linear com a temperatura, comprovada por cultivos em laboratórios (Erez e Luz, 1983). Esta característica foi também constatada em testas do foraminífero bentônico *Uvigerina peregrina* (Shackleton, 1974), razão da sua escolha para monitorar as variações de temperatura do fundo marinho. *Cibicidoides pachyderma* apresenta morfotipo similar ao da *Cibicidoides wuellerstorfi*, táxon recomendado para exame de  $\delta^{13}\text{C}$  (Wefer e Berger, 1991).

Os dados isotópicos são representados pela notação  $\delta$ , que significa:

$$\delta (\text{‰}) = [(\delta_a - \delta_p) / \delta_p] \times 100$$

onde:

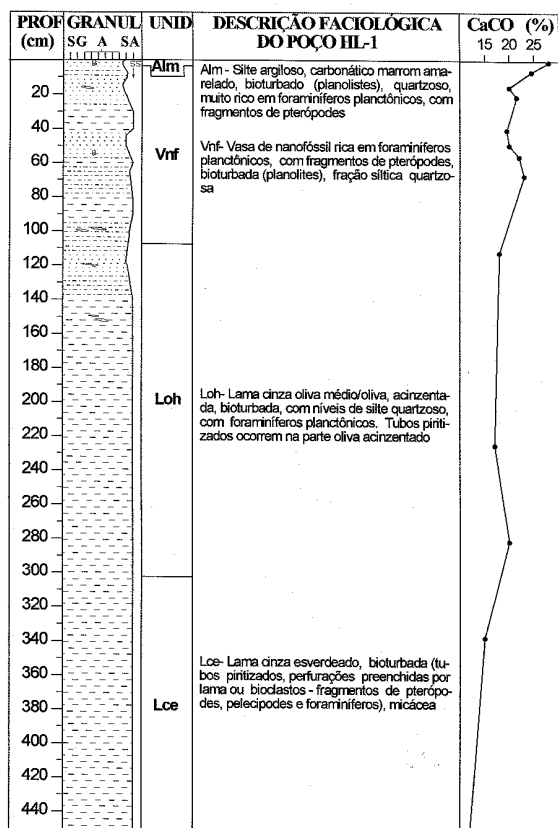
$\delta_a$  = valor da relação isotópica do elemento considerado na amostra (carbono ou oxigênio);

$\delta_p$  = valor da mesma relação isotópica do padrão.

Os valores  $\delta$  estão expressos em relação ao padrão internacional PDB (belemnite da Formação Pee Dee, Carolina do Sul, EUA).

As análises isotópicas foram feitas no CENPES. Utilizou-se espectrômetro de massas Finnigan 252, diretamente acoplado a um sistema automático de obtenção do  $\text{CO}_2$  do carbonato analisado, cuja liberação é feita por meio da acidificação da rocha com ácido fosfórico (100%).

Para efeito de comparação estratigráfica, confrontaram-se os resultados isotópicos aos do *site* 677, perfurado pelo *Ocean Drilling Program*, no Pacífico equatorial, onde se registraram os primeiros estágios climáticos de Emiliani (1955). O objetivo foi identificar, dentre estas variáveis, *data* capazes de contribuir na subdivisão estratigráfica da coluna de rocha, ou de serem correlacionáveis com horizontes quimioestratigráficos de valor geocronológico da curva-padrão internacional.



**Fig. 2** - Seção sedimentar do poço HL-1, suas principais fácies e a variação na concentração de CaCO<sub>3</sub>. (Modificado de Caddah, 1991).

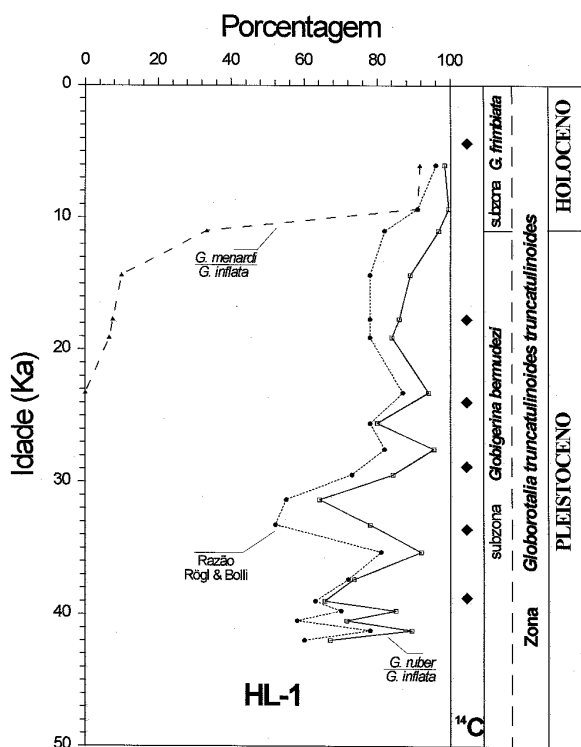
**Fig. 2** - Sedimentary section of well HL-1, its main facies and variations in CaCO<sub>3</sub> concentrations. (Modified after Caddah, 1991).

Levantamentos bioestratigráficos qualitativo e quantitativo, apoiados em 51 amostras (Vicalvi, 1993), e datações radiogênicas baseadas em <sup>14</sup>C e medidas em seis pontos ao longo do furo geotécnico HL-1 (Renato Kowsmann, informação verbal), constituíram o arcabouço cronoestratigráfico previamente estabelecido, sob o qual os resultados quimioestratigráficos puderam ser comparados (fig. 3).

### 3. RESULTADOS ISOTÓPICOS E SUA INTERPRETAÇÃO

#### 3.1. Isótopos de Oxigênio

Na figura 4, registram-se as variações de  $\delta^{18}O$  em rocha-total, em testas dos foraminíferos planctônicos *Globigerinoides ruber* e *Globigerinoides sacculifer*, e dos bentônicos *Uvigerina peregrina* e *Cibicidoides pachyderma*. Estão indicados, também, os valores medidos para a única amostra onde houve a concentração de nanofósseis. Na tabela I, estão listados todos os dados analíticos.



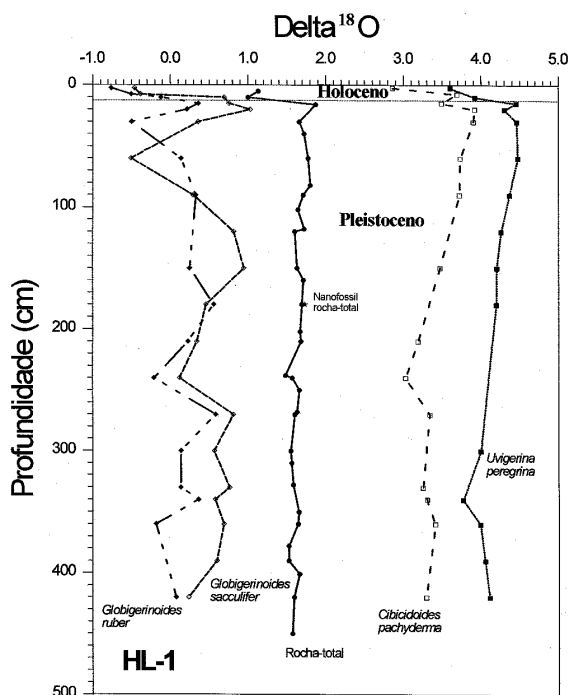
**Fig. 3** - Subdivisão estratigráfica do poço HL-1 com base em zoneamento bioestratigráfico e estudos quantitativos entre faunas quentes e frias. O arcabouço cronoestratigráfico foi alcançado integrando-se estas informações a medições radiogênicas com base em  $^{14}\text{C}$  (♦). Azevedo (1995).

**Fig. 3** - Stratigraphic subdivision of well HL-1 based in biostratigraphic zoning and quantitative studies for hot and cold water fauna. The chronostratigraphic frame was obtained by integrating this information to  $^{14}\text{C}$  (♦) radiogenic measurements. Azevedo (1995).

Na curva isotópica de oxigênio, as variações registradas em rocha-total têm amplitudes e freqüências baixas e comportamento relativamente linear, excetuando-se os primeiros 30 cm, onde fica bem delimitada a passagem Pleistoceno/Holoceno. Os valores médios, em torno de 1,8‰, são inferiores aos medidos em testas de foraminíferos bentônicos, superiores aos dos planctônicos e praticamente idênticos ao da amostra que concentrou nanofósseis. Portanto, os resultados sobre rocha-total situam-se entre os obtidos para os dois grupos de foraminíferos, o que já era esperado por haver mistura do material carbonático presente na amostra.

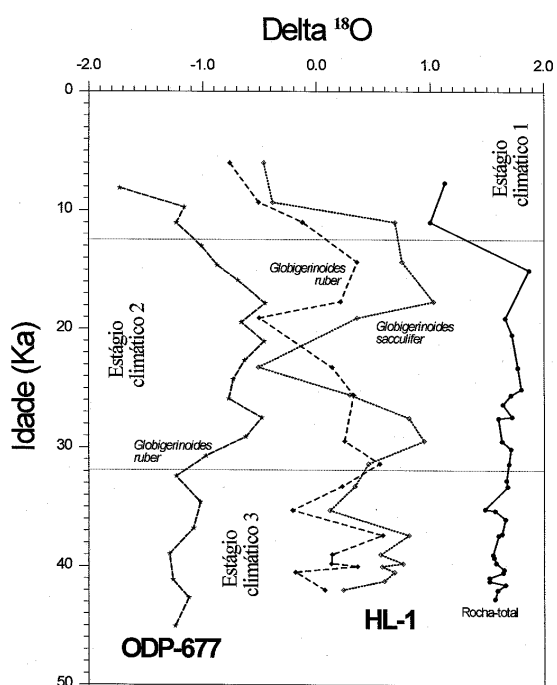
Os valores mais elevados e mais homogêneos de  $\delta^{18}\text{O}$  medidos nos foraminíferos bentônicos (*Cibicidoides* e *Uvigerina*) refletem as temperaturas mais baixas das águas que recobrem o fundo do mar. Os planctônicos têm valores isotópicos menores, bem mais oscilantes, expressando as variações de temperatura a que as camadas mais superficiais e quentes da coluna d'água estão expostas. Por ter resultados mais próximos aos das amostras de rocha-total, concluiu-se que houve maior contribuição da fração planctônica sobre os carbonatos analisados.

Constataram-se, também, nas curvas isotópicas de oxigênio, diferenças nos valores entre taxa de mesmo hábito de vida, devido ao fracionamento isotópico induzido por nuances no metabolismo das espécies – denominado "efeito vital" (Urey, 1947). No entanto, o comportamento similar dessas curvas demonstra que a complexidade dos fatores envolvidos em resultado isotópico não compromete o uso dessa razão em estudos estratigráficos, mesmo comparando resultados isotópicos de rocha-total, ou de carbonato secretado por organismos. Prova disto é a boa correlação entre resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  nos poços HL-1 e ODP-677, notadamente as curvas apoiadas em testas de *Globigerinoides* (fig. 5).



**Fig. 4** - Variações nos resultados isotópicos em testas de foraminíferos bentônicos e planctônicos, em rocha-total e em amostra que concentrou nanofósseis calcários. O limite entre as épocas Pleistoceno e Holoceno é marcado por significativas alterações nos valores da razão isotópica de oxigênio em todas as curvas.

*Fig. 4* - Variations in isotopic results from benthic and planktonic foraminifer tests, in a bulk sample, and a sample concentrating calcareous nannofossils. The Pleistocene/Holocene boundary is well marked by significant value changes for oxygen isotope ratios on all curves.



**Fig. 5** - Correlação entre os resultados da razão isotópica de oxigênio da seção HL-1 (Bacia de Campos) e do poço ODP-677, perfurado no Pacífico equatorial. Os estágios climáticos foram definidos por Emiliani (1955).

*Fig. 5* - Oxygen isotope curves for section HL-1 (Campos Basin) correlated with those from ODP-677 well, drilled in the equatorial Pacific. The climatic stages were defined by Emiliani (1955).

Estabeleceu-se o posicionamento geocronológico das amostras consideradas na figura 5 por interpolação linear. Tomou-se, como pontos de controle do poço HL-1, *data* bioestratigráficos definidos por Vicalvi (1993) ou valores radiogênicos fornecidos pelo método  $^{14}\text{C}$  (Renato Kowsmann, informação verbal). Para a seção do ODP-677, os pontos de referência de idade foram obtidos a partir de correlação com o poço V28-238, igualmente perfurado no Pacífico equatorial, seção que melhor representa os estágios climáticos 1 e 2, de Emiliani (1955), cujos limites foram inferidos por Shackleton e Opdyke (1973).

A significativa redução nos valores isotópicos de oxigênio constatada na parte superior dos poços HL-1 e ODP-677 reproduz a tendência global observada entre os estágios 2 e 1 de Emiliani (1955). Já o limite entre o 3 e o 2 é bem marcado no ODP-677, mas menos expressivo na Bacia de Campos, obscurecido – em parte, pela falta de maior número de datações geocronológicas entre as isócronas de 30 Ka e 40 Ka. O limite entre os estágios isotópicos 3 e 2 no poço HL-1 ocorre à profundidade de 2,4 m, indicado por uma incursão negativa, de curta duração, nos valores de  $\delta^{18}\text{O}$ .

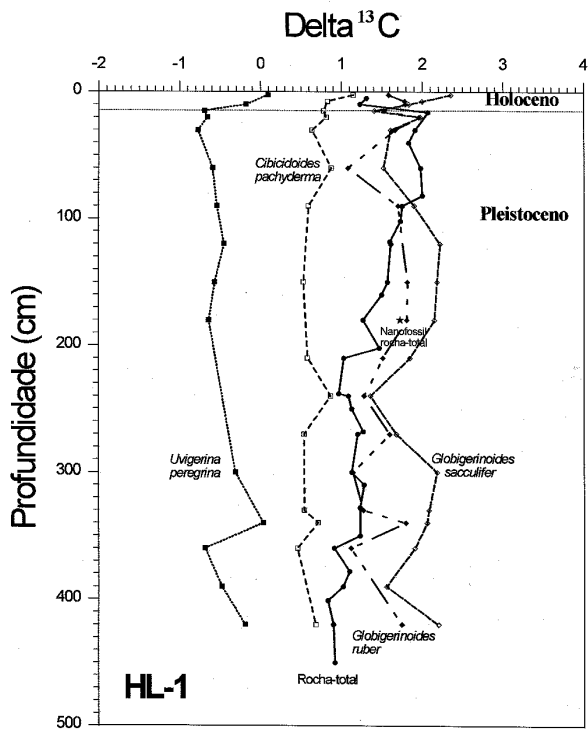
### 3.2. Isótopos de Carbono

As curvas que refletem o comportamento da razão  $\delta^{13}\text{C}$  em rocha-total ou em testas de foraminíferos bentônicos e planctônicos mostram menos consistência (fig. 6). Percebem-se respostas comuns para diferentes espécies de bentônicos, ou entre os dois *taxa* planctônicos. No entanto, a similaridade não é tão visível entre estas duas categorias. A curva de variação isotópica de carbono obtida de rocha-total mostra-se bem mais irregular do que a do oxigênio, mas é mais próxima da dos foraminíferos planctônicos. Na amostra de nanofósseis, registrou-se valor distinto do medido na rocha-total, mas próximo ao do *Globigerinoides ruber*.

Os valores mais elevados de  $\delta^{13}\text{C}$  apresentados pelos foraminíferos planctônicos refletem a maior produtividade orgânica desenvolvida nos estratos superficiais da coluna d'água. A absorção e fixação preferencial do  $^{12}\text{C}$  na matéria orgânica durante o processo metabólico desses microorganismos e, principalmente, na fotossíntese fitoplanctônica, provocam o aumento da concentração de  $^{13}\text{C}$  nos carbonatos ou bicarbonatos presentes na zona fótica. Por isto, medições em testas de foraminíferos planctônicos tendem a registrar valores superiores aos obtidos em bentônicos e são suscetíveis a freqüentes variações nos resultados. Além disso, a particularidade do litoral fluminense de se situar na região de encontro da corrente das Malvinas (massa d'água mais fria, e rica em nutrientes), vinda da Antártica, com a corrente Brasileira (quente e pobre em nutrientes), estabelecendo uma zona de ressurgência na margem oeste do Atlântico Sul, amplifica as variações das respostas isotópicas obtidas nas testas de planctônicos.

O aumento da produtividade primária – parâmetro que afeta diretamente o resultado de  $\delta^{13}\text{C}$  – está, na maior parte das vezes, associado a processos que envolvem variações climáticas no planeta. Os valores isotópicos tendem a se ampliar em épocas de redução drástica da temperatura da Terra e de quedas eustáticas, face ao aumento da oferta de nutrientes para as regiões oceânicas (Haq, 1993). Nesses momentos, são mais fortes a circulação oceânica e os fenômenos de ressurgências, fenômenos que contribuem para elevar a disponibilidade de nutrientes na superfície e a proliferação dos microorganismos planctônicos.

Outros fenômenos associados à temperatura afetam indiretamente o ciclo do carbono. Em épocas de clima frio, a pressão de  $\text{CO}_2$  atmosférico é menor e este gás tende a ser isotopicamente mais leve.



**Fig. 6** - Variações nos resultados isotópicos em testas de foraminíferos bentônicos e planctônicos, em rocha-total e em amostra que concentrou nanofósseis calcários. Embora sem a expressão observada nas curvas do oxigênio, a razão isotópica de carbono também registra importantes variações no limite entre as épocas Pleistoceno e Holoceno.

**Fig. 6** - Variations of isotope results from benthic and planktonic foraminifer tests, in a bulk sample, and a sample concentrating calcareous nannofossils. Although not as expressive as the oxygen curves, the carbon isotope ratio also presents significant changes within the Pleistocene/Holocene boundary.



**TABELA I**  
**OS DADOS GEOQUÍMICOS PARA DIFERENTES GRUPOS DE ORGANISMOS E RAZÕES**  
**ENTRE ESPÉCIES DE FORAMINÍFEROS DO POÇO HL-1**

*TABLE I*  
*GEOCHEMISTRY DATA FOR DIFFERENT ORGANISMS GROUPS OF RATIO*  
*OF FORAMINIFER SPECIES FROM WELL HL-1*

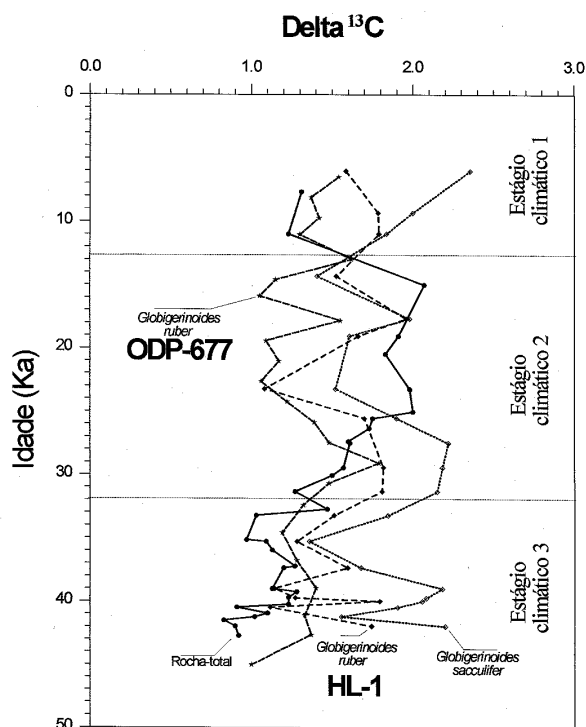
Profundidade (cm)	Globigerinoides ruber (δ <sup>13</sup> C)	Globigerinoides ruber (δ <sup>18</sup> O)	Globigerinoides sacculifer (δ <sup>13</sup> C)	Globigerinoides sacculifer (δ <sup>18</sup> O)	Uvigerina pupillina (δ <sup>13</sup> C)	Uvigerina pupillina (δ <sup>18</sup> O)	Chibicides pupillina (δ <sup>13</sup> C)	Chibicides pupillina (δ <sup>18</sup> O)	Nonafossil (δ <sup>13</sup> C)	Nonafossil (δ <sup>18</sup> O)	Reche-total (δ <sup>13</sup> C)	Reche-total (δ <sup>18</sup> O)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Razão Rogli&Bullii	Razão G. ruber G. inflata	Razão G. meandri G. inflata	Idade (Ks)
0.0													23.00				4.37
1.0	1.59	-0.76	2.35	-0.46		3.60	1.15	2.86			1.31	1.13		96.00	98.40	91.60	
2.5													24.50				
5.0																	
6.0	1.79	-0.51	2.00	-0.39		3.92	0.83	3.69			1.23	1.00		91.00	99.50	91.00	
7.5	1.79	-0.12	1.84	0.69									20.00				
10.0																	
14.0	1.53	0.36	1.41	0.75		4.45	0.78	3.49			2.07	1.87		78.00	89.00	10.00	
15.0													21.50				
16.0																	
19.0	1.96	0.21	1.98	1.03		4.30	0.81	3.92			1.98	1.77		78.00	86.00	2.60	17.69
20.0	1.66	-0.50	1.61	0.36		4.46	0.64	3.90			1.91	1.66		78.00	94.00	6.60	
30.0													19.50				
36.0											1.83	1.72					
40.0													20.00				
44.0													22.00				
50.0	1.08	0.14	1.52	-0.51		4.47	0.88	3.75			1.98	1.77		87.00	94.00	0.00	23.94
60.0																	
65.0											2.00	1.80					
82.0	1.70	0.33	1.90	0.29		4.36	0.59	3.72			1.75	1.71		78.00	80.00	0.00	
90.0													18.00				
100.0																	
102.0																	
118.0											1.60	1.72					
120.0											1.61	1.60					
140.0	1.82	0.25	2.18	0.95		4.20	0.53	3.47			1.57	1.63		73.00	84.30	0.00	
150.0											1.50	1.71					
160.0	1.81	0.56	2.15	0.46		4.19			1.87	1.73	1.27	1.69		55.00	64.10	0.00	
180.0													17.00				
200.0																	
202.0											1.47	1.67					
210.0	1.51	0.23	1.85	0.34			0.58	3.19			1.03	1.68		52.00	78.00	0.00	33.57
215.0											0.97	1.48					
238.0											1.09	1.57		81.00	92.00	0.00	
240.0	1.28	-0.21	1.36	0.12			0.87	3.02			1.13	1.66					
250.0											1.27	1.63					
268.0											1.20	1.60					
270.0	1.60	0.58	1.68	0.81			0.54	3.34			1.13	1.55		72.00	73.50	0.00	38.76
290.0											1.28	1.56		63.00	65.00	0.00	
300.0	1.14	0.14	2.18	0.56		3.99					1.23	1.58					
310.0																	
328.0																	
330.0	1.27	0.13	2.08	0.76			0.54	3.25			1.23	1.58		70.00	85.00	0.00	
340.0	1.79	0.36	2.06	0.58		3.77	0.71	3.30			1.23	1.65					
350.0											1.09	1.64		58.00	71.60	0.00	
360.0	1.12	-0.19	1.91	0.69		3.99	0.46	3.41			1.10	1.52					
378.0											1.02	1.52					
390.0											0.83	1.66					
400.0											0.90	1.59					
401.0													12.00				
420.0	1.74	0.07	2.20	0.24		4.11	0.68	3.29			0.92	1.57		60.00	67.00	0.00	
450.0																	

Com seu volume reduzido, diminui a incorporação à camada superficial do mar (há exsolução de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, porque está mais concentrado na hidrosfera). Esse fenômeno, associado à fotossíntese, conduz ao enriquecimento relativo de <sup>13</sup>C nos carbonatos formados na faixa mais superficial da coluna d'água, induzindo uma covariância entre os valores dos isótopos de carbono e oxigênio. Pode-se observar, nas figuras 5 e 7, essa tendência nos segmentos das curvas de planctônicos de δ<sup>13</sup>C e δ<sup>18</sup>O representativas do estágio isotópico 2, referente à glaciação wisconsiana. O ciclo do carbono é complexo, havendo situações em que o resultado é inverso.

Por sua vez, o aumento das condições climáticas frias gerando massas d'água ricas em oxigênio, principalmente de fundo, tende a ampliar, em muito, a oxidação de matéria orgânica, liberando volumes expressivos de CO<sub>2</sub> enriquecido em <sup>12</sup>C e influenciando a razão δ<sup>13</sup>C no sentido negativo. Este fenômeno é a causa de as curvas isotópicas de carbono dos foraminíferos bentônicos *Uvigerina peregrina* e *Cibicidoides pachyderma* se apresentarem inversamente simétricas às da razão δ<sup>18</sup>O, com a concentração do carbono mais leve aumentando à medida que o fenômeno glacial se amplia (figs. 4 e 6).

Em síntese: nos planctônicos, os valores de δ<sup>13</sup>C reproduzem principalmente a combinação dos efeitos das variações na concentração de CO<sub>2</sub> e produtividade primária ocorridas nos estratos mais superficiais da coluna d'água. Nos bentônicos, o aumento dos teores de O<sub>2</sub> no fundo marinho e a oxidação da matéria orgânica, liberando CO<sub>2</sub> enriquecido em <sup>12</sup>C, é o processo mais importante.

A curva representativa das variações de δ<sup>13</sup>C em rocha-total apresenta comportamento distinto das dos foraminíferos (fig. 6). Em relação aos foraminíferos bentônicos, exibe padrão inverso. No entanto, apresenta similaridade quando comparada às curvas de δ<sup>18</sup>O e δ<sup>13</sup>C em rocha-total, especialmente nos 0,8 m superficiais do poço HL-1. Deste ponto, no sentido da base da seção, observa-se o incremento de <sup>12</sup>C, em taxa que supera a de <sup>16</sup>O na razão δ<sup>18</sup>O. Esses contornos similares demonstram que o parâmetro temperatura influenciou os resultados das razões isotópicas de oxigênio e carbono em rocha-total.



**Fig. 7** - Correlação entre os resultados da razão isotópica de carbono da seção HL-1 (Bacia de Campos) e do poço ODP-677, perfurado no Pacífico Equatorial. Os estágios climáticos foram definidos por Emiliani (1955).

**Fig. 7** - Carbon isotope curves for section HL-1 (Campos Basin) correlated with those from ODP-677 well, drilled in the equatorial Pacific. The climatic stages were defined by Emiliani (1955).

Bem mais difícil é compreender os fatores responsáveis pelas diferenças no comportamento das curvas de  $\delta^{13}\text{C}$  de rocha-total e as dos foraminíferos. Certamente, boa parte do problema está na origem diferenciada dos carbonatos presentes nas amostras de rocha-total, que, além das testas de foraminíferos, contém outros componentes biogênicos e carbonatos autigênicos em proporções não-quantificadas nesse estudo. O valor isotópico distinto obtido da amostra que concentrou nanofósseis calcários dá a dimensão dessa contribuição no resultado final.

Comparando-se resultados obtidos para a seção quaternária da Bacia de Campos com os do ODP-677 (fig. 7), comprova-se que os isótopos de carbono podem ser utilizados em estudos estratigráficos. A similaridade entre os resultados em testas de *Globigerinoides ruber* presentes nas duas seções é marcante. Já não se pode dizer o mesmo sobre a curva construída com base em rocha-total, que se comporta de modo distinto das demais.

#### **4. SIGNIFICADO PALEOCEANOGRÁFICO DOS RESULTADOS ISOTÓPICOS**

Analisando-se resultados isotópicos de oxigênio e carbono obtidos do testemunho HL-1, é possível deduzir as condições climáticas e oceanográficas impostas à Bacia de Campos nos últimos 40 000 anos. De modo geral, nas curvas construídas estão reproduzidos os principais eventos planetários ocorridos do final do Pleistoceno aos dias atuais. Todas as curvas de oxigênio registram a tendência global de aumento progressivo nos valores de  $\delta^{18}\text{O}$ , indicando aumento do volume de gelo ocorrido no Pleistoceno, seguido de forte redução no Holoceno. As oscilações isotópicas observadas na porção mais superior do testemunho estabelecem o limite Pleistoceno/Holoceno à profundidade de 12,5 cm, coincidente, portanto, com a indicação oferecida por elementos bioestratigráficos (figs. 3 e 5).

No Holoceno, a significativa redução nos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  marca o final da glaciação wiscosiana, quando começa o degelo das calotas polares, acompanhado de progressivo aquecimento das águas oceânicas.

A temperatura mais elevada e as maiores variações impostas à porção mais superficial da coluna d'água são reconhecidas pelos valores isotópicos mais baixos de  $\delta^{18}\text{O}$  e pelas maiores amplitudes e freqüências das flutuações isotópicas dos foraminíferos planctônicos quando comparados aos bentônicos (fig. 4).

As curvas isotópicas construídas a partir de testas de foraminíferos bentônicos sugerem, para a massa d'água que recobria o fundo da bacia, incremento inversamente proporcional à temperatura na concentração dos gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ . Os resultados mais positivos de  $\delta^{13}\text{C}$  registrados nas testas de *Globigerinoides* e nas amostras do tipo rocha-total indicam menor concentração de  $\text{CO}_2$  e maior produtividade primária nas camadas mais superficiais da massa d'água.

#### **5. CONCLUSÕES**

Fez-se um estudo estratigráfico em seção holocênica da Bacia de Campos (Campo de Marlim), em área de talude. O objetivo foi apreciar os resultados isotópicos de oxigênio e carbono em rocha-total e avaliar a adoção destes parâmetros geoquímicos como ferramentas de correlação estratigráfica e de interpretação ambiental. Analisaram-se, de maneira integrada, informações bio-, para- e quimioestratigráficas.

A consecução desses objetivos fez testar e comprovar que a fração carbonática de rocha-total pode ser utilizada na medição dos valores  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{13}\text{C}$ . Com este material, economizam-se tempo e custos laboratoriais. No método tradicional, as mensurações são feitas em testas de organismos (em geral, foraminíferos). Se as vantagens são grandes, os riscos quanto à qualidade dos resultados também o são. Por isto, compararam-se resultados das análises isotópicas de oxigênio e carbono, envolvendo testas de foraminíferos e rocha-total. Os resultados alcançados demonstram a equivalência nas assinaturas isotópicas medidas em ambos os tipos de amostra, comprovando a possibilidade de sua utilização em estudos estratigráficos.

A consistência das variações desses parâmetros geoquímicos do ponto de vista estratigráfico também foi demonstrada, ao se compararem os resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^{13}\text{C}$  aos do poço ODP-677, perfurado no Pacífico equatorial pelo *Ocean Drilling Program*. Os três estágios isotópicos mais jovens de Emiliani (1955) foram reconhecidos, possibilitando o posicionamento do limite Pleistoceno/Holoceno. Além disto, apresentaram-se interpretações quanto à evolução do ambiente sobre a Bacia de Campos nos últimos 40 000 anos, abordando aspectos como variações na temperatura da massa d'água, produtividade e preservação da matéria orgânica.

Em síntese, a utilização integrada de ferramentas estratigráficas não-convencionais, como quimioestratigrafia, com informações convencionais de bioestratigrafia e paleoecologia, em seções quaternárias, permite alcançar resoluções geocronológicas da ordem de  $10^3$  anos, e permite compreender muitos dos parâmetros controladores do processo sedimentar, além de desvendar um pouco mais a história climática e oceanográfica de nosso planeta.

## AGRADECIMENTOS

Aos geólogos Armando Hashimoto, Nilo Chagas Azambuja Filho, Carlos Souza Cruz, Rogério Antunes e Renato Kowsmann, pelas discussões e contribuições à pesquisa; aos colegas do laboratório de isótopos estáveis do SEGEQ, pelo apoio recebido na parte analítica; e à PETROBRAS, pela permissão para publicar os resultados do estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, R.L.M. *Isótopos de oxigênio e carbono em estudos estratigráficos de detalhe na Bacia de Campos: aplicações no Quaternário e Oligoceno*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995. 138p. Dissertação (Mestrado).
- CADDAH, L.F.G. *Análise sedimentológica de testemunhos a pistão do talude Quaternário da Bacia de Campos : PROCAP/GER-02*. Macaé: PETROBRAS. DESUD. DINTER. SELAB, 1991. 51p. Comunicação técnica SELAB 006/91.
- EMILIANI, C. Depth habitats of some species of pelagic Foraminifera as indicated by oxygen isotope ratio. *American Journal of Science*, New Haven, v. 252, p. 149-158, 1954.
- EMILIANI, C. Pleistocene Temperatures. *Journal of Geology*, Chicago, v. 63, p. 538-578, 1955.
- EREZ, J., LUZ, B. Experimental paleotemperature equation for planktonic foraminifera. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Oxford, v. 45, p.1025-1031, 1983.
- HAQ, B. U. Deep-sea response to eustatic change and significance of gas hydrates for continental margin stratigraphy. In: POSAMENTIER, H. W. *et al.* (Ed.). *Sequence Stratigraphy and Facies Associations*. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1993. p. 93-106. (International Association of Sedimentologists. Special publication, n. 18)
- RODRIGUES, R. Aplicação dos isótopos estáveis do carbono e oxigênio na exploração do petróleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, 1., 1978. Rio de Janeiro. *Anais ...* Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Petróleo, 1978, v. 1, p. 11-25.
- RODRIGUES, R., TAKAKI, T. Estratigrafia isotópica de seqüências carbonáticas cenozóicas da costa norte do Brasil. *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 177-182, 1987.
- SHACKLETON, N. J. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and benthonic foraminifera genus *Uvigerina* : isotopic changes in the ocean during the last glacial. In : COLLOQUIUM INTERNATIONAL RESEARCH SCIENCE, 219., 1974. [*Proceedings*]...[S.l. : s.n.], 1974. p. 2203-2210.
- SHACKLETON, N. J., HALL, M. A. Stable isotope records in bulk sediments. In: PISIAS, N.G. *et al.* (ed). OCEAN DRILLING PROGRAM, 1995, Texas. *Proceedings...* Washington : U.S. Printing Office, 1995. v. 138, p. 797-805.
- SHACKLETON, N.J., HALL, M.A., PATE, D. High-resolution stable isotope stratigraphy from bulk sediments. *Paleoceanography*, New York, v. 8, n. 2, p. 141-148, 1993.
- SHACKLETON, N. J., OPDYKE, N. D. Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific, core V28-238 : oxygen isotope temperatures and ice volumes on a  $10^5$  year and  $10^6$  year scale. *Quaternary Research*, San Diego, v. 3, p. 39-55, 1973.
- TAKAKI, T. *Utilização de isótopos como indicadores ambientais: bacias de Campos, Santos e Espírito Santo*. Rio de Janeiro : PETROBRAS.CENPES.DIVEX.SEGEQ, 1984. 27f. (Relatório interno, n. 0530).
- TAKAKI, T., RODRIGUES, R. *Utilização de isótopos como indicadores ambientais nas Bacias do Norte do Brasil*. Rio de Janeiro : PETROBRAS.CENPES.DIVEX.SEGEQ, 1986. 1v. Relatório interno.

- UREY, H.C. The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of Chemical Society*, London, v. 69 p. 562-581, 1947.
- VICALVI, M.A. *Resultados de estudos micropaleontológicos (foraminíferos) da seção quaternária dos testemunhos HL-1 (Campo de Marlim) e BU-91/GL-05 (Campo de Albacora)*. Rio de Janeiro : PETROBRAS.CENPES. DIVEX. 1993, p. 11 (Relatório preliminar).
- WEFER, G., BERGER, W.H. Isotope paleontology : growth and composition of extant calcareous species. *Marine Geology*, Amsterdam, v. 100, n. 1/4, p. 207-248, 1991.

## EXPANDED ABSTRACT

*The usefulness of oxygen and carbon stable isotopes from bulk samples as a stratigraphic tool has been evaluated in the Quaternary section of the Campos Basin. The methodological approach is based on the comparison of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  values measured in foraminifer tests and calcareous nannofossils with those obtained from bulk samples. The results suggest that bulk samples can be reliably used in isotopic studies, which are far less expensive and time-consuming than those based purely on calcareous microfossils.*

*Results demonstrate that oxygen isotope curves from benthic and planktonic foraminifers and from bulk samples are more or less parallel. Values measured from bulk samples are lower than those from benthic foraminifer tests, higher than those from planktonic foraminifers, and almost identical to those from calcareous nannofossils. Higher  $\delta^{18}\text{O}$  values measured in benthic foraminifers reflect the colder temperature of ocean bottom waters. Planktonic foraminifer curves display more oscillating patterns but lower isotopic values, pointing to constant temperature shifts in the surface layers of the water column. The Pleistocene/Holocene boundary is very well marked in all three curves.*

*With respect to carbon isotope readings from foraminifers, common responses in the behavior of the  $\delta^{13}\text{C}$  ratio are displayed by two benthic species and the two planktonic species considered in this study. However, such similarity becomes less clear when both foraminiferal categories are compared with each other. The carbon isotope curve from a bulk sample is however far more irregular, and does not adequately reflect adequately the isotopic behavior of foraminiferal species. The sample analyzed for calcareous nannofossils also yields a carbon isotope value distinct from that of the bulk sample, but closer to the value obtained from **Globigerinoides ruber**.*

*Responses shown by planktonic foraminifers  $\delta^{13}\text{C}$  data reflect the higher organic productivity which often develops in surface layers of the water column. This phenomenon is in most cases related to episodes of marked environmental instability, brought about by the planet's climatic changes. Benthic organisms also do not usually remain unchanged when passing through sharp temperature variations. Cold climates give rise to water masses charged with  $\text{O}_2$ , which considerably increase oxidation of organic matter and release of large volumes of  $\text{CO}_2$  enriched in  $^{12}\text{C}$ , thus inducing more negative  $\delta^{13}\text{C}$  values. This phenomenon explains the mirror relationship which exists between the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  curves of benthic foraminifers in the well studied, whilst the concentration of  $^{12}\text{C}$  rises in response to increased glaciation.*

*Regarding the results for bulk samples, the  $\delta^{13}\text{C}$  curve, although distinct from that of foraminifers, is shown to behave in a manner similar to the oxygen isotope curve, especially in Holocene strata. In the Pleistocene section, the increment measured in the  $^{12}\text{C}$  values surpasses that of  $^{16}\text{O}$  in the  $\delta^{18}\text{O}$  ratio. Similar contours of the  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  curves are interpreted to indicate that temperature was also influential in bulk sample results. In addition to foraminifers, other planktonic groups directly or indirectly involved in primary productivity may have contributed to the enrichment in  $\delta^{13}\text{C}$  of carbonates studied as the temperature of oceanic waters fell progressively. This would compensate for the opposite tendency of reduced carbon isotope values at the expense of benthic foraminifer tests.*

*Isotopic curves for the Quaternary section of the Campos Basin were compared with those of the ODP site 677, drilled in the equatorial Pacific. The  $\delta^{18}\text{O}$  curves show good agreement and permit identification of the last three of Emiliani's climatic stages. Reasonable similarity is also displayed by the  $\delta^{13}\text{C}$  curves obtained from tests on **Globigerinoides ruber** in both wells. The same does not apply to the bulk sample results; their curves behave quite differently from those of other samples.*