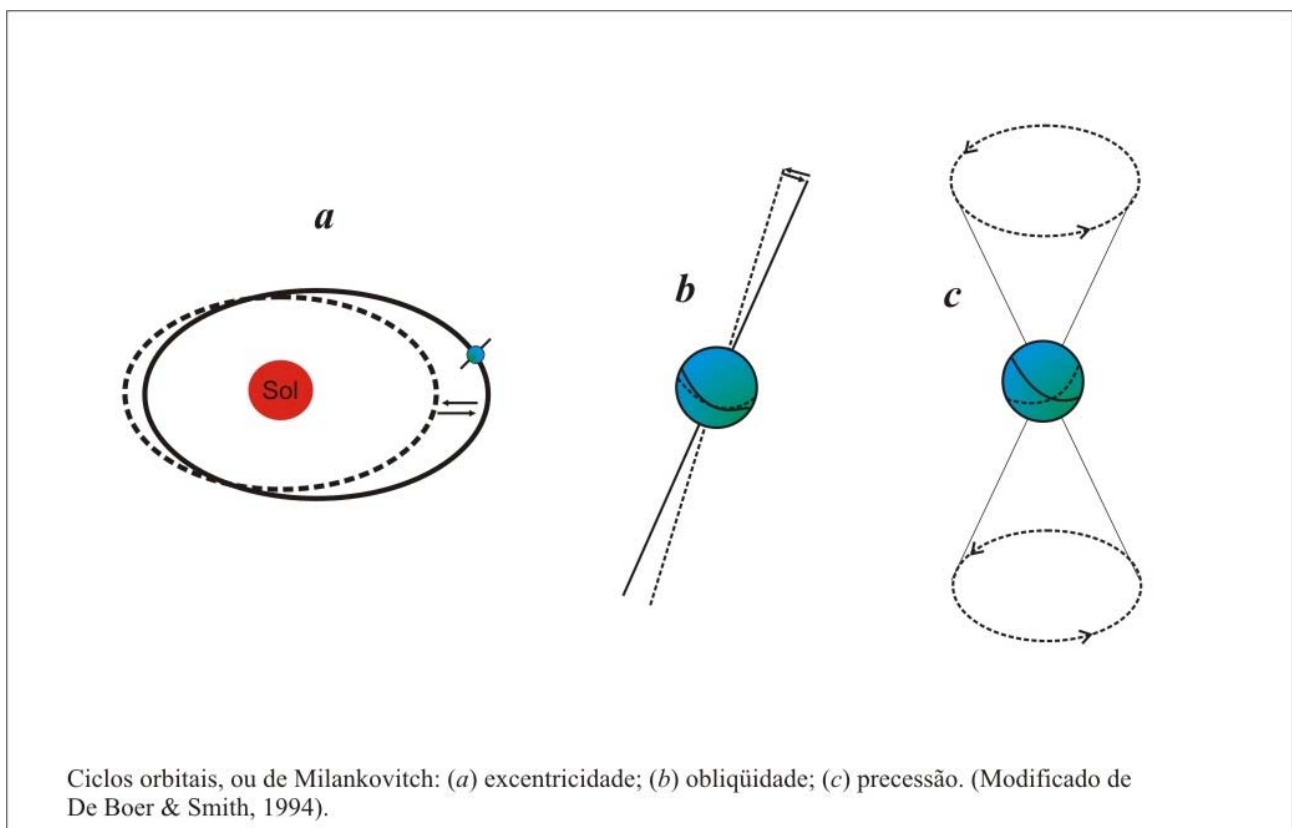


CICLOS ORBITAIS OU CICLOS DE MILANKOVITCH

José Guilherme Rodrigues da Silva

De acordo com as descobertas matemáticas de Milankovitch (Imbrie & Imbrie, 1979), a intensidade dos efeitos da insolação varia com a latitude. A influência do ciclo de obliquidade, a inclinação do eixo da Terra, que oscila aproximadamente a cada 41 mil anos, é maior nas regiões polares, tornando-se mais fraca em direção ao equador. Por outro lado, a influência do ciclo de precessão, cujo período é de cerca de 22 mil anos, provocando a variação da distância entre a Terra e o Sol, é menor nos pólos e maior no equador. Como a quantidade de radiação recebida em uma dada latitude e estação é determinada pelo ângulo de inclinação e pela distância entre a Terra e o Sol, a forma da curva de radiação varia sistematicamente do pólo ao equador (Imbrie & Imbrie, 1979).



Milankovitch também fez cálculos que apresentavam a resposta quantitativa dos mantos de gelo às mudanças na radiação solar. Publicou seus resultados em 1938, mostrando as variações em latitude das margens dos mantos de gelo para os últimos seiscentos e cinquenta mil anos (Imbrie & Imbrie, *op. cit.*). Porém, seus cálculos não mostraram a excentricidade como um fator indutivo importante nas glaciações.

A teoria de Milankovitch foi alvo de disputas durante décadas. Porém, em 1976, Hays *et alii* demonstraram que as frequências astronômicas estavam presentes de forma significativa nos dados

paleoclimáticos. Assumiram primeiramente em seu estudo que o sistema climático tinha uma resposta linear à indução orbital. A partir de dois testemunhos do fundo do mar, que continham um registro contínuo de 450 mil anos, analisaram três parâmetros sensíveis às mudanças climáticas e os transformaram em séries temporais geológicas. Os parâmetros eram a composição isotópica de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) em foraminíferos planctônicos, uma estimativa das temperaturas de verão na superfície do mar, baseada em radiolários, e a abundância relativa de outras espécies de radiolários. As técnicas numéricas de análise espectral utilizadas pelos autores foram desenvolvidas para procurar evidências nas frequências de variação da obliquidade e da precessão. Hays *et alii* (1976) encontraram, nos espectros de intensidade, ciclos quase-periódicos correspondentes aos orbitais. Contudo, apesar da presença dos períodos de 42 mil e de 19 e 23 mil anos, representando a obliquidade e a precessão respectivamente, os ciclos dominantes em todos os espectros analisados variavam entre 94 e 122 mil anos, o período da excentricidade. Esse ciclo não havia sido levado em consideração quando do desenvolvimento da análise espectral, mas tinha aparecido naturalmente, como uma forte evidência de sua importância na indução das glaciações, uma idéia que já vinha sendo fermentada na época. Concluíram que a indução devida à excentricidade não poderia resultar em uma resposta linear do sistema climático. Seus efeitos seriam provocados pela modulação que esse ciclo provocaria no de precessão, que possui uma amplitude proporcional. Uma resposta a essa modulação seria a observada nos mantos de gelo. A indução provocada pela precessão implicaria num tempo de crescimento das geleiras maior que o de recuo. O tempo de crescimento seria proporcional ao ciclo de 100 mil anos, com uma recessão rápida de alguns milhares de anos.

Apesar de ainda existirem argumentos a favor de uma casualidade entre os períodos orbitais e suas respostas climáticas (Karner & Muller, 2000), após décadas de discussões, a indução orbital no clima é hoje em dia aceita pela maior parte dos geocientistas. André Berger tem sido um dos autores que mais publicam trabalhos sobre as bases matemáticas desse assunto. Segundo esse autor (Berger, 1980), a teoria de Milankovitch indica que as glaciações ocorrem quando:

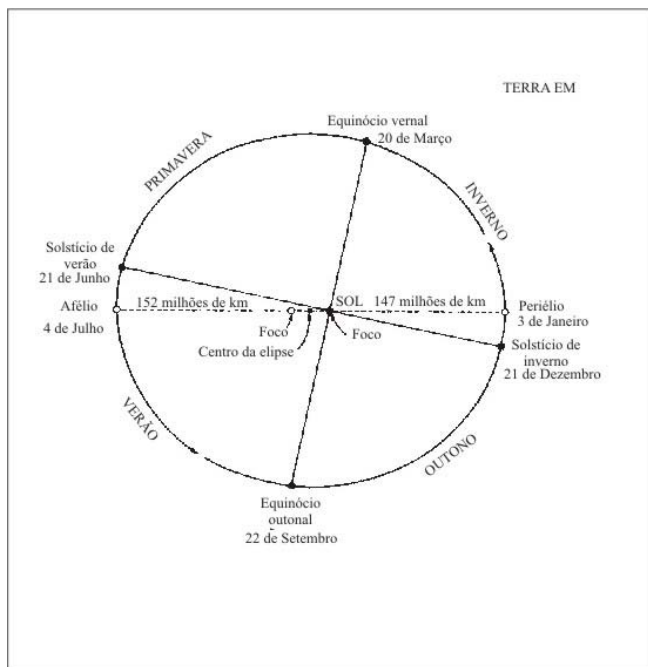
a-) o verão começa no afélio, ou seja, quando a distância entre a Terra e o Sol é maior;

b-) a excentricidade é máxima, ou seja, a distância entre a Terra e o Sol no afélio é a maior possível. Isso afeta não só a intensidade relativa e a duração das estações nos diferentes hemisférios, mas também a diferença entre a insolação máxima e mínima recebida durante um ano;

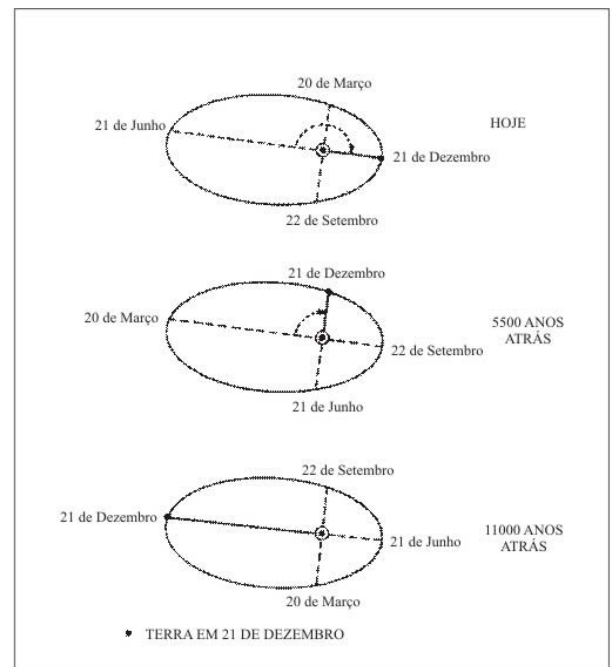
c-) a obliquidade é baixa, significando que a diferença entre verão e inverno é fraca e o contraste latitudinal é maior.

Em suma, as glaciações são iniciadas quando os verões são frios, como argumentou Köppen (Imbrie & Imbrie, 1979), pois a diminuição na insolação inibe a fusão das geleiras, que, dessa forma, se expandem, gerando grandes mantos de gelo continentais. O acréscimo da área glaciária

intensifica também o albedo e a perda de energia calorífica, aumentando ainda mais o volume e a área das geleiras. Sendo assim, as diferenças na insolação e a ocorrência de períodos glaciais acontecem em função dos ciclos orbitais. Se a energia proveniente do Sol é assumida como constante, a quantidade de radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre em uma dada latitude e estação depende apenas das mudanças da posição do eixo da Terra em relação ao seu movimento em torno do Sol, as quais são produto dos efeitos gravitacionais do sistema formado pela Terra, pelo Sol e pela Lua e das influências dos outros planetas do sistema solar (Imbrie & Imbrie, 1980; Berger, 1980 e 1988; De Boer & Smith, 1994). Porém, os padrões geográficos e sazonais de irradiação dependem principalmente apenas da obliquidade e da precessão (Imbrie & Imbrie, 1980).



Datas do equinócio e do solstício. No equinócio, o eixo da Terra está em ângulo reto em relação à eclíptica, o plano de deslocamento relativo do Sol em torno do planeta, e o dia e a noite têm igual duração ao longo do globo. No solstício de verão, o pólo norte está inclinado em direção ao Sol e o hemisfério norte tem o dia mais longo do ano. No solstício de inverno, o pólo norte está inclinado de maneira oposta ao Sol e o hemisfério norte tem o dia mais curto do ano. (Modificado de Imbrie & Imbrie, 1979).



Precessão dos equinócios. Devido à precessão do eixo e a outros movimentos astronômicos, as posições do equinócio e do solstício se deslocam lentamente ao longo da órbita elíptica da Terra e completam um ciclo inteiro a cada 22 mil anos aproximadamente. Há 11 mil anos, o solstício de inverno ocorreu próximo ao lado oposto da órbita em relação à sua ocorrência atual. Como resultado, a distância entre a Terra e o Sol, medida em 21 de dezembro, muda. (Modificado de Imbrie & Imbrie, 1979).

As mudanças na posição do eixo da Terra citadas no parágrafo anterior, de acordo com cálculos matemáticos e análises sedimentares, tiveram seus períodos correspondentes resumidos por Imbrie & Imbrie (1980) e De Boer & Smith (*op. cit.*) da seguinte forma (figuras III.14, III.15 e III.16):

- ➔ *Precessão*: possui um período absoluto da ordem de 22 mil anos, com períodos principais médios de cerca de 19 e 23 mil anos e extremos em 14 e 28 mil anos. O efeito da precessão está 180° fora de fase entre os hemisférios norte e sul e é maior no equador, diminuindo em direção aos pólos. Esse efeito caracteriza as mudanças latitudinais no que é denominado de equador calórico (figura Equador Calórico), ou seja, nas regiões próximas ao equador que recebem maior quantidade de energia proveniente do Sol, causando deslocamentos importantes no limites entre zonas climáticas adjacentes. Nas latitudes médias (20° a 40°), o comprimento relativo das estações e o contraste entre inverno e verão são afetados, implicando assim em variações climáticas de mesma frequência e amplitude que a precessão, relacionadas à intensidade das monções e às razões entre precipitação e evaporação.
- ➔ *Obliquidade*: a inclinação do eixo da Terra em relação à normal ao plano da órbita varia entre 22° e $24,5^{\circ}$, com um período médio de cerca de 41 mil anos e modula a sazonalidade, principalmente nas altas latitudes.
- ➔ *Excentricidade*: varia entre órbitas mais elípticas (excentricidade de cerca de 0,06) e mais circulares (cerca de 0,001), estando atualmente com aproximadamente 0,01. Possui uma periodicidade de aproximadamente 100 mil anos na média, com componentes importantes em 95, 123 e 136 mil anos. Variações regulares superpostas ocorrem com períodos em torno de 400 ou 413 mil e 1,3 e 2 milhões de anos. A excentricidade modula o efeito climático dos ciclos de precessão, resultando em ciclos sedimentares formados por feixes (*bundles*) de quatro ou cinco pares (*couplets*) relativos à essa última. É muito importante salientar essa modulação, aproveitando as palavras de De Boer & Smith (1994): “como a variabilidade temporal da frequência dos ciclos de precessão é muito maior que a dos de excentricidade, algumas análises demonstram a dominância desse último sobre o primeiro. Porém, as diferenças na amplitude dos picos produzidos em diferentes tipos de análises de séries temporais não são resultado da influência do ciclo de excentricidade ser maior do que a do ciclo de precessão no clima ou na oceanografia, mas sim do fato de que o ciclos de excentricidade causam variações que são muito mais regulares em tempo que as da precessão, cuja frequência varia de um fator de dois (14 a 28 mil anos)”.

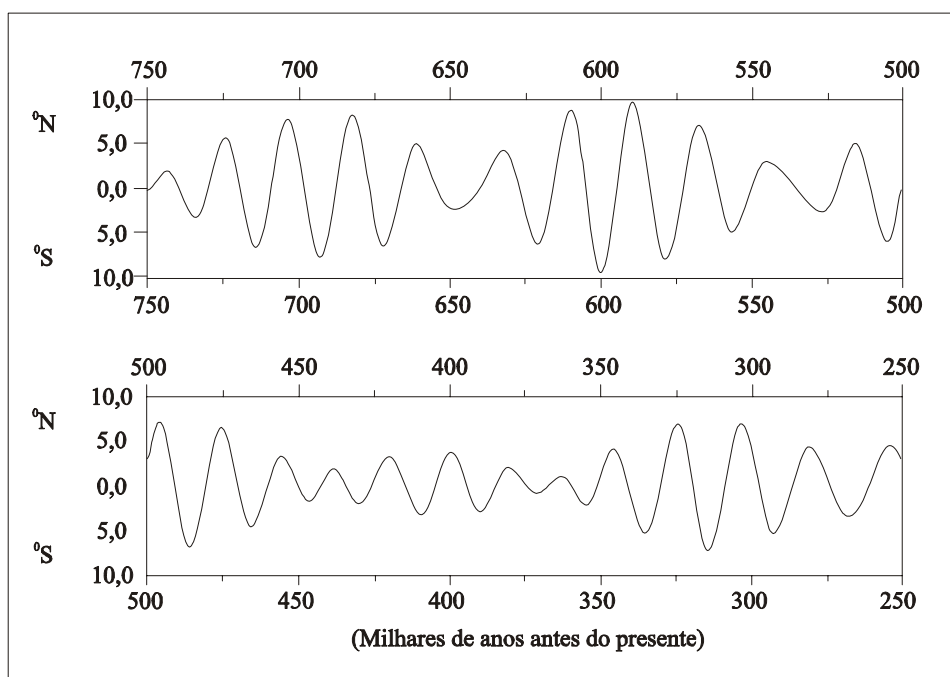


Figura Equador Calórico – Mudanças de posição do equador calórico entre 750 e 250 mil anos atrás. Notar a variabilidade da frequência. Os períodos entre posições latitudinais extremas (norte ou sul) do equador calórico variam entre 14 e 28 mil anos. (Modificado de De Boer & Smith, 1994).

Embora as curvas dos parâmetros orbitais descritos (figura Geometria Orbital) mostrem que os mesmos possuem um grande número de componentes senoidais, com períodos e amplitudes definidos, seus espectros calculados são dominados por um pequeno número de picos, ou valores de períodos, como foi visto acima. Soma-se a isso o fato de que seus efeitos combinados no clima e na sedimentação tendem a criar uma periodicidade com uma grande variação na amplitude e mudanças importantes nos intervalos de tempo. Sendo assim, cada um dos parâmetros orbitais pode ser considerado uma função quase-periódica do tempo (Imbrie & Imbrie, 1980; Einsele *et alii*, 1991).

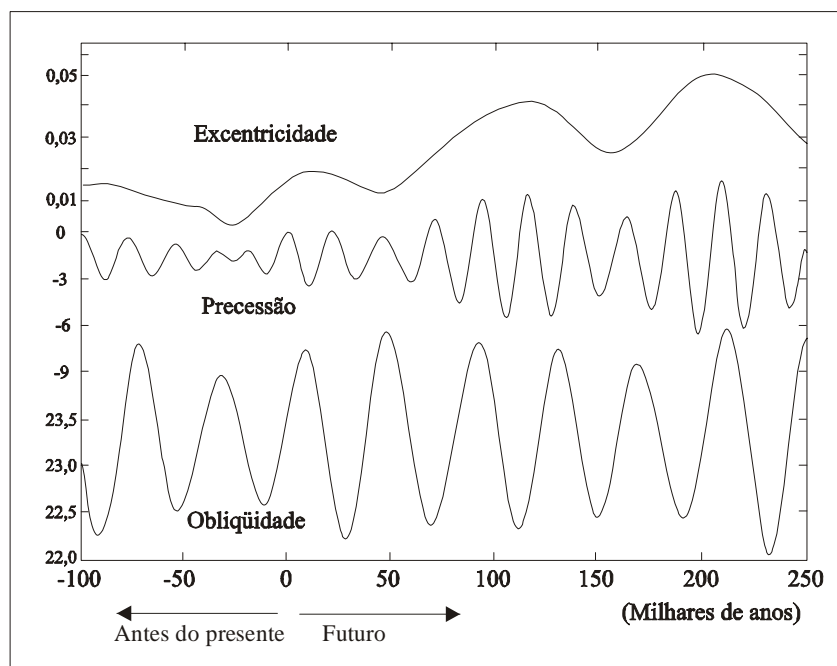


Figura Geometria Orbital – Variações na geometria orbital em função do tempo. Essas variações podem ser calculadas para o passado e o futuro, conforme mostra a figura (Modificado de Imbrie & Imbrie, 1980).

Deve-se levar em consideração, porém, que a forma que os sistemas climáticos respondem às variações na indução orbital não é linear, como mostraram Hays *et alii* (1976). Os processos de sedimentação dependem de outras variáveis, além da insolação e da assimilação das mudanças provocadas por essa última no clima. Conseqüentemente, pode acontecer um retardo (*lag*) temporal de até alguns milhares de anos entre a indução e a resposta dos processos sedimentares (De Boer & Smith, 1994). Por outro lado, as evidências matemáticas e no registro sedimentar são muito fortes a favor da teoria orbital. As variações na razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ em conchas de foraminíferos pelágicos dos registros quaternários, muito bem datadas numericamente, principalmente pela excelente correlação com dados paleomagnéticos, e utilizadas como uma medida do volume de gelo terrestre, são uma incontestável evidência da ligação entre os ciclos glaciais e os padrões de insolação (Hays *et alii*, 1976; De Boer & Smith, 1994). Na realidade, o que é observado nos sedimentos é o resultado dessa indução, e os retardos temporais citados acima podem provocar apenas um deslocamento nas periodicidades, sendo que o tempo relativo aos efeitos cumulativos das diferentes frequências orbitais é preservado. Além disso, como a assimilação climática da indução provocada pelos ciclos orbitais é feita pela transferência do calor através da atmosfera da Terra, qualquer ambiente deposicional pode ser afetado, não somente aqueles ligados aos climas glaciais (De Boer & Smith, 1994).

PERIODICIDADES ORBITAIS NO TEMPO GEOLÓGICO

Periodicidades ligadas aos ciclos de Milankovitch têm sido observadas em registros sedimentares pré-quaternários, o que levou Berger & Loutre (1989) a calcular os períodos orbitais, a partir das mudanças nos parâmetros de distância entre a Terra e a Lua e de rotação da Terra (a qual diminui devido à fricção provocada pelo efeito das marés), para os últimos 440 milhões de anos. Mais tarde (Berger & Loutre, 1994), utilizaram fontes diferentes para esses parâmetros, de forma que chegaram a duas respostas possíveis, uma para os últimos 440 milhões de anos e outra para os últimos 2,5 bilhões de anos (Berger & Loutre, 1994), apresentados na tabela abaixo.

DATA (Milhões de anos)	PERÍODOS DE PRECESSÃO (mil anos)		PERÍODOS DE OBLIQUIDADE (mil anos)	
0	19,0	23,0	41,0	54,0
72	18,6	22,5	39,4	51,2
270	17,6	21,0	35,2	44,3
298	17,4	20,7	34,3	42,9
380	16,8	19,9	32,1	39,4
440	16,4	19,3	30,5	37,2
0	19,0	23,0	41,0	54,0
72	18,6	22,5	39,3	51,1
270	17,5	20,9	34,8	43,7
298	17,4	20,7	34,2	42,7
380	16,9	20,0	32,4	40,0
440	16,6	19,5	31,1	38,1
500	16,2	19,0	29,9	36,2
1000	14,8	17,2	25,5	30,0
1500	13,8	15,8	22,5	26,0
2000	12,6	14,3	19,6	22,1
2500	11,3	12,7	16,7	18,5

Tabela – Valores estimados dos períodos principais da precessão e da obliquidade ao longo do tempo. (modificado de Berger & Loutre, 1994).

Como se pode notar por essa tabela, apenas a obliquidade e a precessão estão listadas. A excentricidade, segundo os autores, não teria sofrido variações significantes, o que faz com que as razões precessão:excentricidade e obliquidade:excentricidade tenham mudado ao longo do tempo geológico (De Boer & Smith, 1994). Outro ponto digno de nota é que a obliquidade possui uma variabilidade maior do que a precessão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Berger,A. 1980. The Milankovitch astronomical theory of paleoclimates: a modern review. **Vistas in Astronomy**, 24:103-122.

Berger,A. 1988. Milankovitch theory and climate. **Reviews of Geophysics**,26(4): 624-657.

Berger,A. ; Loutre,M. F. 1989. Pre-Quaternary Milankovitch frequencies. **Nature**, v.342, p. 133, November.

Berger,A. ; Loutre,M.F. 1994. Astronomical forcing through geological time. In: De Boer,P.L.; Smith,D.G. (ed.). 1994. **Orbital forcing and cyclic sequences**. Oxford: Blackwell Scientific Publications. p. 15-24. (International Association of Sedimentologists Special Publication, 19).

De Boer,P.L.; Smith,D.G. 1994. Orbital forcing and cyclic sequences. In: De Boer,P.L.; Smith,D.G. (ed.). 1994. **Orbital forcing and cyclic sequences**. Oxford: Blackwell Scientific Publications. p. 1-14. (International Association of Sedimentologists Special Publication, 19).

Einsele,G.; Ricken,W.; Seilacher,A. 1991. Cycles and events in stratigraphy - basic concepts and terms. In: Einsele,G.; Ricken,W.; Seilacher,A. (ed.). 1991. **Cycles and events in stratigraphy**. Berlin: Springer-Verlag. p. 1-19.

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, December.

Imbrie,J.; Imbrie,K.P. 1979. **Ice ages – solving the mystery**. Cambridge: Harvard University Press. 224 p.

Imbrie,J.; Imbrie,J.Z. 1980. Modeling the climatic response to orbital variations. **Science**, v.207, p. 943-953, February.

Karner,D.B.; Muller,R.A. 2000. A causality problem for Milankovitch. **Science**, v.288, p. 2143-2144, June.