Universidade Federal Fluminense

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia e Geofísica Marinha

IDENTIFICAÇÃO DE SINAIS CICLOESTRATIGRÁFICOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE SINAIS DE SUCESSÕES DO PERMO-TRIÁSSICO

Mayara Soares Aguiar de Oliveira

Niterói – RJ

Agosto de 2016

IDENTIFICAÇÃO DE SINAIS CICLOESTRATIGRÁFICOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE SINAIS DE SUCESSÕES DO PERMO-TRIÁSSICO

Trabalho de conclusão de curso submetido ao programa de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito final para obtenção do grau de bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Ribeiro Franco

Niterói – RJ

Agosto de 2016

MAYARA SOARES AGUIAR DE OLIVEIRA

IDENTIFICAÇÃO DE SINAIS CICLOESTRATIGRÁFICOS ATRAVÉS DE ANÁLISE DE SINAIS DE SUCESSÕES DO PERMO-TRIÁSSICO

Trabalho de conclusão de curso submetido ao programa de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito final para obtenção do grau de bacharel em Geofísica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Antônio Baptista Netto – DG/UFF

Prof. M.Sc. Pillar de Oliveira Carvalho Rodrigues – CM/IFES

Prof. Dr. Daniel Ribeiro Franco – COGE-ON/MCTI

Niterói – RJ

Agosto de 2016

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus que meu deu forças para atravessar várias etapas até aqui. Sem ele nada disso seria possível.

Agradeço aos meus pais pelo incentivo aos estudos, pelo suporte moral e psicológico, pelos conselhos nos momentos difíceis, pelo companheirismo e amor.

Agradeço ao meu esposo por ter suportado minhas oscilações de humor. Ele sempre soube que era por uma boa causa.

Agradeço muito ao meu orientador, Dr. Daniel Ribeiro Franco, pelos ensinamentos, pela ajuda, pelas broncas, pela paciência e por seu espírito de equipe.

Agradeço ao Ricardo Martins por toda ajuda. Quem dera que existisse uma pessoa como ele em todas as equipes do mundo. Sem ele meu trabalho não teria nenhum mapa e nenhuma figura de qualidade. Não existem palavras pra expressar minha gratidão.

Agradeço a minha amiga Pillar Carvalho que além da ajuda nas pesquisas dos temas abordados ao longo do trabalho, também me deu apoio moral em diversas situações. Quero que nossa amizade dure enquanto estivermos vivas.

Agradeço aos amigos de faculdade e de estágio que me acompanharam ao longo desta trajetória.

Agradeço a banca examinadora por ter cedido um tempo para minha apresentação.

Agradeço a Universidade Federal Fluminense, aos professores do LAGEMAR e ao Observatório Nacional pelas oportunidades.

Enfim, agradeço a todos que estiveram ao meu lado e que fizeram parte desta fase da minha vida. Que Deus abençoe muito a vida de todos vocês e que eu possa retribui-los

Resumo

O debate sobre mudanças climáticas tem crescido expressivamente, bem como suas causas e consequências. Dentre as principais discussões, os mecanismos de forçagem possuem o destaque principal – especialmente nas últimas décadas. Uma vez que mudanças climáticas abruptas ocorreram ao longo do passado geológico – algumas com comportamento quase-periódico –, a cicloestratigrafia vem sido cada vez mais empregada na identificação, caracterização, correlação e interpretação de variabilidades ambientais cíclicas no registro estratigráfico. Nos últimos tempos, esta disciplina vem experimentando grandes avanços, nos disponibilizando correlações mais precisas dos registros estratigráficos.

A teoria de Milankovitch indica que os parâmetros orbitais influenciam a quantidade de radiação que nosso planeta recebe do sol, de forma cíclica, e que esta influencia é capaz de gerar mudanças radicais no clima de forma periódica e cíclica, afetando, por consequência, a característica dos processos de sedimentação.

O estudo desta teoria ganhou força e foi aperfeiçoada ao longo das últimas décadas. Nos últimos anos, cientistas a tem empregado para a construção de uma escala de tempo astronômica. Esta escala é bem estabelecida para o Cenozoico – mas, para o Mesozoico e Paleozoico, ainda há demanda por mais pesquisas, dada a dificuldade de se obter dados provenientes de sucessões bem preservadas que revelem tais periodicidades.

Neste trabalho, discute-se um estudo cicloestratigráfico sobre uma seção carbonática permotriássica, situada ao sul da China, através da aplicação de ferramentas de análise espectral para a identificação de componentes periódicas referentes aos ciclos de Milankovitch. Os objetivos centrais são os de se verificar a validade da teoria astronômica a partir de um dos modelos disponíveis (Berger et al., 1992) para este período, e para estimar o período total para a deposição desta seção.

<u>Palavras-chave</u>: Clima, quase-periódico, Milankovitch, astronômica, Permo-Triássico, China, cicloestratigrafia e análise espectral.

Abstract

Climate changes, as well as its causing factors and consequences are subject of important debates. Among the main discussions, its forcing mechanisms have attracted considerable attention through the last decades. As abrupt climate chances had occurred throughout the geological past - some of these exhibiting a quasi-periodic pattern - the cyclostratigraphy has been increasingly used at identification, characterization and interpretation efforts of cyclic environmental variabilities through the stratigraphic record. In the last years, this discipline has experiencing great advances, hence providing more accurate correlations of geological profiles.

Milankovitch's theory indicates that the orbital parameters periodically changes the amount of radiation that our planet receives from the Sun, and that such cyclic influence can lead to extreme changes in climate and hence changing sedimentation patterns. This theory is nowadays well-accepted and it has been applied for an assemblage of the astronomical time scale (ATS). The ATS is well-established for Cenozoic times, although for Mesozoic and Paleozoic Eras there is still a demand for complementary results, given the lack of datasets from pre-Cenozoic sedimentary profiles.

In this work, we discussed about a cyclostratigraphy study conducted on a Permo-Triassic carbonate section from South China by means of spectral and evolutive, time-frequency analyses, aiming to evaluate the validity of the astronomical theory predicted by one of the available modelings (Berger et al., 1992) and to estimate the total depositional interval for the studied section.

<u>Keywords</u>: Climate, quasi-periodic, Milankovitch, astronomical, Permian Triassic, China, cycloestratigraphy and spectral analysis.

Sumário

Agra	adeci	mentos	i		
Resumo					
Abstract					
Lista de Figuras					
Lista de Tabelas					
Lista de Abreviaturas e Simbologia					
I.	Intro	oducão	1		
	Due		2		
11.	Pro e o	tempo geológico	3		
	II.1	Ciclos de Milankovitch	3		
	II.2	O papel da cicloestratigrafia	7		
III.	Revi de s sul d	são: calibração astronômica sucessões Permotriássicas do la China	9		
IV.	Contexto Geológico				
	IV.1	Bacia de Nanpanjiang	11		
	IV.2	Área de Estudo	13		
V.	Méto	odos de análise	16		
	V.1	Análise de sinais cicloestratigráficos	16		
	V.2	Análise espectral	16		
	V.3	Análise tempo-frequência: espectro evolucionário	17		
	V.4	Calibração astronômica	18		
VI.	Resu	ultados e Conclusões	19		
VII.	. Bibliografia				

Lista de Figuras

II.1	Representação gráfica dos Ciclos de Milankovich. (modificado de Freitas, 2006).		5			
II.2	Variação dos ciclos de obliquidade, precessão e excentricidade para os últimos 1Ma (modificado de Schwarzacher, 1993).					
II.3	Exemplo de um espectro de amplitude da excentricidade, destacando- se os principais períodos encontrados. (Modificado de Schwarzacher, 1993).		6			
II.4	Evolução dos períodos de precessão curta (PC), precessão longa (PL), obliquidade curta (OC) e obliquidade longa (OL) ao longo dos últimos 500 Ma, em comparação com os ciclos de excentricidade longa (EL; 405 ka) e curta (EC; 100 ka), segundo o modelo de Berger et al. (1992).		8			
IV.1	Mapa paleogeográfico da Bacia de Nanpanjiang (modificado de Lehrmann et al., 2007).		12			
IV.2	Disposição dos afloramentos (seções A e B), referentes à seção Taiping da Plataforma Chongzuo-Pingguo.		14			
IV.3	Detalhes dos afloramentos (seção A, à esquerda; seção B, à direita).		14			
IV.4	Detalhes de camadas de rocha carbonática da seção A (23° 29.993' N; 107° 31.488'E, elevação = 298 m), exibindo 53 camadas e 115 sub- camadas em afloramento na região de Pingguo, província de Guangxi, sul da China, totalizando 13,5 m de espessura. (A): foto de acamamentos, exibindo pronunciada inclinação (40-60 graus), com detalhe para nível possívelmente relacionado ao limite de extinção em massa, pouco abaixo do limite Permo-Triássico; (B): detalhe de acamamentos sucessivos, aonde se pode notar a presença de subcamadas, possivelmente indicativos de processos harmônicos na variabilidade deposicional devido a processos de oscilação do nível do mar; (C): indicação do registro de subcamadas e camadas (acamamentos) na seção A; (D): detalhe do procedimento de medida - uma vez indicada estratigraficamente, cada camada e suas respectivas subcamadas foram medidas com o auxílio de uma trena; (E) e (G): série de dados cicloestratigráficos, relacionados aos dados de espessura das camadas; (F) e (H): série de dados cicloestratigráficos, relacionados aos dados de espessura das subcamadas. A série representada em (E) corresponde à análise de sinais cicloestratigráficos apresentada nesta monografia.		15			
VI.1	Espectro de potencias de altura estratigráfica das camadas da seção A e espectro evolucionário da mesma série de dados.		20			

VI.2 (A) espectro de potencias de altura estratigráfica das camadas da 22 seção A; (B) espectro de potencias da série metronômica de camadas da seção A, onde n é o número de camadas.

Lista de Tabelas

7

 II.1 Valores estimados para duração dos períodos de precessão curta (PC), precessão longa (PL), obliqüidade curta (OC) e obliqüidade longa (OL), para os últimos 500 Ma (modificado de Berger et al., 1992).

Lista de Abreviaturas e Simbologia

ATS:	Astronomical Time Scale	 9
CPP:	Chongzuo-Pingguo	 11
EC:	Excentricidade Curta	 7
EL:	Excentricidade Longa	 7
GBG:	Great Bank of Guizhou	 11
LPT:	Limite Permo-Triassico	 13
OC:	Obliquidade Curta	 7
OL:	Obliquidade Longa	 7
PC:	Precessão Curta	 7
PL:	Precessão Longa	 7

I. Introdução

Nas últimas décadas, o debate sobre o aquecimento global, bem como suas causas e consequências, vem ganhando atenção cada vez maior junto à comunidade científica. Dentre as principais discussões, a ação antrópica como mecanismo de forçagem para o aquecimento global – especialmente ao que é constatado ao longo dos séculos XX e XXI (Goldemberg & Lucon, 2008) – é de grande relevância, dado seu potencial de alteração climática em curtas escalas de tempo devido ao aporte de gases de efeito estufa (Alley, 2000).

Entretanto, o passado geológico do planeta é marcado por eventos de profundas e abruptas alterações climáticas, tanto em escala regional quanto global, e que vêm sendo associados a diferentes processos causais – alguns deles exibindo comportamentos periódicos (Einsele, 1991; Silva, 2001). Como exemplos de eventos de mudanças climáticas extremas na história do planeta, destacam-se os conhecidos como "Snowball Earth" (Hoffman *et al.*, 1988; Vincent et. al., 2004; Boyle et. al., 2007); "Pequena Idade do Gelo" (Araújo, 2002; Usoskin & Mursula, 2003; Silva & Paula, 2009; Cronin et al., 2010; Miller et al., 2012; Li et al., 2016); "Younger Dryas" (Alley, 2000; Santos, 2007; Broecker et al., 2010; Pinter et al., 2011; García-Ruiz et. al., 2016).

Deste modo, torna-se evidente que o estudo de paleoclimas representa uma poderosa ferramenta para a compreensão dos processos climáticos, forçados por mecanismos naturais ou pela ação do homem, pelos quais nosso planeta passou. Tais informações representam utilidade notável para compreensão das variações climáticas que vivemos atualmente e para modelagem das variações climáticas futuras pelas quais a Terra pode vir a passar.

Neste ínterim, a cicloestratigrafia é considerada uma subdisciplina da estratigrafia que lida com a identificação, caracterização, correlação e interpretação de variabilidades ambientais cíclicas no registro estratigráfico (Fischer et al., 1990; Weedon, 2003; Strasser et al., 2006). Nas últimas décadas, vem sofrendo um grande avanço com a disponibilização de correlações mais precisas entre registros estratigráficos e variabilidades ambientais (Schwarzacher, 2000; Franco, 2007). Para seções sedimentares suficientemente longas e com taxas de sedimentação favoráveis, é possível identificar-se desde quase-periodicidades em escalas sub-decadais, até oscilações em escala orbital $(10^4 - 10^5 \text{ anos})$ (Hinnov, 2000; Silva, 2001). Para a identificação de tais processos harmônicos, os métodos de análise espectral representam ferramentas fundamentais para a decodificação do conteúdo harmônico possivelmente presente nas séries de dados estratigráficos - tanto no domínio do tempo quanto no domínio da altura estratigráfica – permitindo, assim, a identificação das componentes harmônicas em espectros de potência (Weedon, 2003).

Em particular, um dos grandes problemas em aberto em estudos geológicos se refere às causas da extinção em massa ocorrida no Permo-Triássico – o maior evento de extinção conhecido na História da Terra há cerca de 252 milhões de anos (Erwin, 1994; Clarkson et al., 2015). Foi responsável pelo desaparecimento, respectivamente, de cerca de 90% das espécies marinhas e de 70% das famílias de vertebrados terrestres (Erwin, 1994). Este evento durou cerca de 60 mil anos (Clarkson et al., 2015) e suas causas vêm sendo amplamente debatidas pela comunidade científica. Por exemplo, hipóteses como anoxia generalizada da coluna d'água nos oceanos (Wignall & Twitchett, 1996), acidificação dos oceanos (Clarkson et al., 2015), vulcanismo de larga escala (Ivanov et al., 2013) e possíveis impactos extraterrestres (Yin et al., 2007) têm sido propostos nos últimos anos. A despeito dos processos causais, é de consenso que as mudancas que ocorreram na biosfera foram significativas, considerando-se as variações globais nas razões isotópicas de estrôncio, carbono e enxofre (Baud et al., 1989); os efeitos deste evento ecossistemas continuam conosco até hoje, pois os que surgiram posteriormente continuam dominando os oceanos modernos (Erwin, 1994).

Neste ínterim, a teoria astronômica de paleoclimas – ou teoria de Milankovitch – demonstra que parâmetros orbitais determinam a quantidade de radiação recebida do sol, de forma harmônica, e que é capaz de gerar mudanças radicais no clima de forma periódica e cíclica, afetando, por consequência, a característica dos processos de sedimentação. Esta tese ganhou força ao longo das últimas décadas, e,nos últimos anos, vem servindo de ponte para a determinação de uma nova escala temporal para calibração do tempo geológico - a chamada "escala de tempo astronômico". No momento, esta escala é relativamente bem determinada para o Cenozoico – mas, para o Mesozoico e Paleozoico, ainda há demanda por mais pesquisas, dada a dificuldade de se obter dados provenientes de sucessões bem preservadas que revelem tais periodicidades.

Neste trabalho, discute-se um estudo cicloestratigráfico sobre uma seção carbonática permotriássica, aflorante na região de Pingguo, Província de Guangxi, sul da China, através da aplicação de ferramentas de análise espectral para a identificação de componentes periódicas referentes aos ciclos de Milankovitch. Os objetivos centrais são os de se verificar a validade da teoria astronômica a partir de um dos modelos disponíveis (Berger et al., 1992) para este período, e para estimar o período total para a deposição desta seção.

II. Processos harmônicos climáticos e o tempo geológico

O clima da Terra tem passado por mudanças constantes ao longo de sua existência, e a intensidade destas mudanças varia de lugar a lugar e de tempo em tempo (Berger et. al., 1992; Schwarzacher, 1993; Dergachev, 2002). Variações climáticas anuais e variações de longos períodos de tempo são resultado de processos internos naturais e de influências externas que atuam num sistema complexo que caracteriza o clima terrestre (Berger et. al., 1992; Dergachev, 2002). O sistema interno inclui a atmosfera, os oceanos, massas de gelo e a biosfera enquanto o sistema externo tem o Sol como principal gerador de mudanças de longos períodos (Dergachev, 2002) – com potencial de afetar os padrões deposicionais de nosso planeta (Einsele *et al.*,1991). Estes subsistemas interagem um com o outro, produzindo um efeito de *feedback* que pode resultar na amplificação ou no abrandamento dos processos envolvidos (Berger et. al., 1992). O entendimento deste sistema complexo requer a coleta de dados consideráveis e variados de escala global destes diferentes subsistemas (Berger et. al., 1992).

A modelagem climática possui o papel de reproduzir a história climática do nosso planeta com a finalidade de observar a sua evolução e ditar até que ponto a ação antrópica é relevante (Berger et. al., 1992). Informações quantitativas sobre o clima do passado podem ser utilizadas como chave para compreensão climática atual e para previsão do clima futuro.

Desta forma, a teoria de Milankovitch – teoria que visa à relação entre a radiação que a Terra recebe do Sol e as mudanças climáticas em escala global (Berger et. al., 1992) – é utilizada como um dos alvos de investigação neste trabalho.

II.1 Ciclos de Milankovitch

A história climática do planeta Terra é marcada por períodos mais frios que outros, denominados *Idades de Gelo* (Berger & Loutre, 2007). Ao longo do tempo geológico, estes intervalos tiveram em geral duração relativamente curta e o mais recente e mais bem documentado é o do Quaternário, que engloba os últimos 2 Ma (Berger, 1992).

A glaciação do Pleistoceno corresponde ao último máximo glacial de uma sucessão de idades do gelo, que são muito bem explicadas pela teoria astronômica de paleoclimas proposta pelo matemático sérvio Milutin Milankovitch (1879-1958). Esta teoria visa explicar as variabilidades temporais relacionáveis ao comportamento orbital e rotacional da Terra, e a influência desta variabilidade sobre a quantidade de radiação que a Terra recebe – o que

pode, eventualmente, provocar as glaciações que são observadas no registro geológico (Berger, 1992; Loutre, 2003; Kodama & Hinnov, 2015). Tais variabilidades, explicáveis pela interação entre a Terra e os corpos vizinhos do Sistema Solar, ocorrem de maneira periódica em escalas de tempo da ordem de $10^4 - 10^5$ anos, compreendem os chamados *Ciclos de Milankovitch* (Fig. II. 1), e que são:

- Excentricidade (E): determinada pela razão entre a distância focal e o eixo maior de uma elipse, impõe que a translação da Terra varia de órbitas quase circulares (e ≅ 0,001) até orbitas mais elípticas (e ≅ 0,06) atualmente, a excentricidade é estimada como em torno de 0,017 (Weedon, 2003). As periodicidades principais são de aproximadamente 400 ka e 100 ka (Kodama & Hinnov, 2015), praticamente constantes ao longo da história do planeta (Berger et al., 1992);
- Obliquidade (O): relacionada à variação do ângulo de inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano orbital, e que se dá entre 22,5° e 24,5° atualmente, o valor do ângulo de inclinação do eixo de rotação é de cerca de 23,5°, apresentando nos dias de hoje um período principal em torno de 41 ka). A inclinação do eixo de rotação está diretamente relacionada às variações sazonais em insolação. Sua variação altera a distribuição de radiação solar entre o equador e os polos, e sua influência predomina em altas latitudes (Hinnov, 2000). No passado geológico, as periodicidades observadas para a obliquidade eram menores (Berger et al., 1992);
- <u>Precessão</u> (P): movimento tipo "peão", que é causado pelo efeito de atração lunar e solar sobre a região equatorial do planeta. Este movimento desloca as posições de equinócio e solstício em relação ao periélio e afélio. Sua periodicidade atual é de aproximadamente 20 ka, com periodicidades menores registradas no passado (Berger, 1977).

A partir das características descritas acima, podemos concluir que os parâmetros orbitais determinam de maneira praticamente direta (i) a quantidade de radiação que será distribuída na superfície da Terra; (ii) o gradiente de temperatura entre o equador e os polos e (iii) as características dos verões e invernos. Considera-se que a obliquidade é o principal parâmetro que influencia na geometria da insolação recebida pelo planeta, enquanto a precessão e a excentricidade influenciam na distância Terra-Sol (Loutre, 2003).



Figura II.1: Representação gráfica dos três principais ciclos orbitais definidos por Milankovich. (Modificado de Freitas, 2006).

A teoria de Milankovitch foi questionada durante várias décadas, por muitas dúvidas quanto à sua validade. No ano de 1976, Hays et al., através de estudos baseados em dois testemunhos marinhos referentes a ~ 450 ka de sedimentação, analisaram três tipos de parâmetros obtidos, e que eram sensíveis a mudanças climáticas – isótopos de oxigênio em foraminíferos, estimativa de temperaturas de verão baseada em radiolários, e abundância relativa das espécies de radiolários. Ao montarem tais séries de *proxies paleoclimáticos* em relação ao tempo, obtiveram espectros de potências com ciclos periódicos correspondentes aos ciclos de Milankovitch. Foram observadas periodicidades de 42 ka, 23 ka e 19 ka, que eram notavelmente compatíveis, respectivamente, com os ciclos de obliquidade e precessão; outros sinais, de periodicidades de 122 ka e 94 ka, foram atribuídos ao ciclo de

excentricidade. Pela Figura II.2, são representadas as curvas dos três parâmetros orbitais descritos para o último milhão de anos. Apesar destas curvas apresentarem-se como uma composição de senóides, com amplitudes e períodos definidos, sues espectros são dominados por um pequeno número de picos – ou seja, com um número restrito de valores para os períodos orbitais (Fig. II.3).



Figura II.2: Variação dos ciclos de obliquidade, precessão e excentricidade para os últimos 1Ma (Modificado de Schwarzacher, 1993).



Figura II.3: Exemplo de um espectro de amplitude da excentricidade, destacando-se os principais períodos encontrados. (Modificado de Schwarzacher, 1993).

Os períodos discutidos acima para os três parâmetros orbitais referem-se a valores estimados para o presente. Para o passado geológico, diversos autores (e.g., Berger et al., 1992; Laskar, 1990; Laskar et al., 2004), sugerem

Idade (Ma)	Período (ka)				
	PC	PL	OC	OL	
0	19,000	23,000	41,000	54,000	
50	18,800	23,600	39,900	52,100	
100	18,500	22,300	38,800	50,200	
150	18,200	21,900	37,700	48,500	
200	18,000	21,500	36,600	46,700	
250	17,700	21,200	35,600	45,000	
300	17,400	20,700	34,200	42,900	
350	17,000	20,200	32,900	40,700	
400	16,700	19,700	31,600	38,700	
450	16,300	19,200	30,300	36,800	
500	16,000	18,700	29,000	35,000	

Tabela II.1 – Valor estimado da duração dos períodos, para os últimos 500 milhões de anos, da precessão curta (PC), precessão longa (PL), obliquidade curta (OC) e obliquidade longa (OL). Modificado de Berger et al. (1992).

que os períodos de obliquidade e precessão eram menores devido ao menor efeito acumulado de perturbação pelos planetas vizinhos e dissipação por marés no sistema Terra-Lua (Tabela II.1 e Fig. II.4). Por outro lado, os valores calculados para excentricidade não apresentam variação significativa ao longo da existência do nosso planeta, sendo considerados bons metrônomos na medição dos parâmetros orbitais em sucessões sedimentares (Berger et al., 1992; Hinnov, 2013).

II.2 O papel da cicloestratigrafia

A cicloestratigrafia é definida como uma subdisciplina da estratigrafia, que lida identificação, caracterização, correlação interpretação com а е de variabilidades ambientais cíclicas no registro estratigráfico (Fischer et al., 1990; Weedon, 2003; Strasser et al., 2006). Segundo Perlmutter & Azambuja Filho (2004), a cicloestratigrafia engloba dois aspectos principais: o primeiro que analisa a maneira como o clima interage com os processos sedimentares a fim de produzir ciclos estratigráficos, e o segundo, que estuda as técnicas de medição do tempo através desses ciclos, a fim de produzir uma escala de tempo de alta resolução. Existem três fatores que podemos associar a ciclos estratigráficos: mudanças de nível do mar, tectonismo (soerguimento e subsidência) e mudanças climáticas. Mudanças do nível do mar causadas pela



Figura II.4: Evolução dos períodos de precessão curta (PC), precessão longa (PL), obliquidade curta (OC) e obliquidade longa (OL) ao longo dos últimos 500 Ma, em comparação com os ciclos de excentricidade longa (EL; 405 ka) e curta (EC; 100 ka), segundo o modelo de Berger et al. (1992).

ocorrência das eras glaciais e interglaciais foram o primeiro fator a ser reconhecido com potencial de induzir sequências sedimentares com ciclicidade (Perlmutter & Azambuja Filho, 2004).

Os ciclos mais explorados por esta disciplina são os ciclos de Milankovitch; porém ciclos de menor periodicidade têm sido reportados cada vez mais nos últimos tempos (Einsele *et al.*, 1991). Nas últimas décadas, a cicloestratigrafia vem sofrendo um avanço significativo, disponibilizando correlações mais precisas entre os registros estratigráficos e as variabilidades ambientais (Schwarzacher, 2000; Franco, 2007). Uma vez identificados, os ciclos sedimentares podem ser utilizados como unidades mapeáveis e, como são associados a ciclos climáticos astronomicamente induzidos, podem conduzir à criação de uma escala de tempo absoluta mais bem precisa do que qualquer outra disponível (Hinnov, 2013).

A cicloestratigrafia, como tema central deste trabalho de monografia, será aplicada para: (i) a realização de estudo sobre a ciclicidade evidente em acamamentos de uma sucessão carbonática do sul da China, e se a sedimentação desta foi influenciada por forçagem orbital.

III. Revisão: calibração astronômica de sucessões Permotriássicas do sul da China

Recentemente, Wu e colaboradores (Wu et al., 2012; 2013) realizaram estudos cicloestratigráficos em sucessões sedimentares oriundas do sul da China – próximas à área de estudo definida para esta monografia, e que serão empregados para comparação com os resultados apresentados nesta monografia (seção VI).

De maneira geral, estes dois trabalhos tinham por objetivo central a identificação de periodicidades em escala orbital a sub-orbital (que seriam relacionadas a processos de forçagem sobre a sedimentação), bem como para contribuírem para o refinamento da ATS para a Era Paleozóica. Os trabalhos foram desenvolvidos utilizando-se séries de dados de susceptibilidade magnética (MS) e de magnetização remanente anisterética (ARM), medidos através de espécimes de rocha coletados ao longo das estratigrafias investigadas.

A analise de 2012 foi realizada na seção Daxiakou (Permiano Inferior) com proxys de ARM e MS para o mesmo testemunho e os espectros de potência gerados exibiram picos acima do nível de confiança de 95%. Para a realização de calibração astronômica, foram considerados os seguintes valores de período para os ciclos orbitais: 405 ka e 100 ka (excentricidade), 44,4 ka e 35,2 ka (obliquidade), 21,1 ka e 17,7 ka (precessão), de acordo com os valores preditos para o Permo-Triássico conforme modelo astronômico de Berger et al. (1992); os ciclos de 405 ka e 100 ka foram utilizados como pontos de ancoragem para a calibração astronômica.

Além da escala de tempo astronômica, eles também contaram com os resultados de um experimento de datação U-Pb como base de comparação e confirmação do tempo estimado pela ATS para o testemunho em questão e os comprimentos médios para os parâmetros orbitais encontrados foram de 13,11 m, 3,55 m e 0,71 para os ciclos de 405 ka, 100 ka e 17,7 ka, respectivamente.

Em particular, Wu et al. (2012) indicaram ciclos básicos, variando em espessura entre 6 cm e 20 cm, como registros de periodicidades sub-orbitais. Adicionalmente, sugeriram que grupos de quatro a sete destes ciclos constituiriam megaciclos, com 0,6 a 0,8 m de espessura, e que poderiam ser interpretados como o ciclo de precessão (em torno de 20 ka) - que modulariam os ciclos básicos.

Wu et al. (2013) realizaram estudos em duas seções diferentes: Shangsi (através de séries de ARM) e Meishan (MS) (vide Figura IV.1 para a localização destas formações). Um detalhe importante neste estudo é que as medidas estavam vinculadas a datações absolutas – possibilitando a transposição dos dados do domínio do tempo para a estratigrafia. A análise de sinais cicloestratigráficos revelou valores médios de 9,4 m e 2,4 m para os ciclos de 405 ka e 100 ka, respectivamente.

IV. Contexto Geológico

As sucessões de rochas carbonáticas analisadas neste trabalho são oriundos da região da cidade de Pingguo (Província de Guangxi), e são associados à plataforma carbonática da Bacia de Nanpanjiang, situada ao sul da China. A seguir, apresenta-se uma breve discussão acerca do contexto geológico regional (Figura IV.1).

IV.1 Bacia de Nanpanjiang

A placa sul da China, formada pelo Cráton Yangtze e pelo sistema de falhas do sul da China, é considerada, segundo Lehrmman et al. (2005), como uma única placa devido à sua estabilidade desde o Proterozóico, sendo também caracterizada pela deposição de carbonatos de águas marinhas rasas. De acordo com alguns autores (e.g., Lehrmann et al., 1998; 2005) esta placa sofreu processo de rifteamento durante o Devoniano. Se desprendeu do que hoje é a Austrália, tendo derivado para o norte através do mar de Tétis, e cruzou o equador durante o Permiano, antes de colidir com a placa norte da China durante o Triássico Médio – formando uma bacia de ante-país.

Na porção sul do Cráton Yantze ocorre a Bacia de Nanpanjiang – descrita como uma enseada marinha profunda (Lehrmann et al., 2005; Li et al., 2012), e que se abre amplamente ao longo das províncias de Guangxi e Yunnan (China); segundo alguns autores (e.g., Lehrmann et al., 2005; 2007), representa o mais longo registro de sedimentação marinha da China, compreendendo desde o Proterozóico Superior até o Triássico Superior. Algumas plataformas carbonáticas de águas rasas (e.g., Great Bank of Guizhou (GBG), plataforma Chongzuo-Pingguo (CPP) desenvolveram-se dentro desta bacia (Lehrmann et al., 2007; Galfetti et al., 2008), sendo que cada uma destas plataformas é delineada por fácies de plataformas carbonáticas marinhas rasas e por fácies bacinais de grande profundidade (Lehrmann et al., 2007).

Os estratos do Permiano Superior no CPP são compostos pelas Formações Heshan e Dalong. A Formação Heshan é composta por folhelhos bauxíticos finos em sua base, e sua parte superior é dominada por calcários grossos (Lehrmann et al., 2007). A formação pode chegar até a 225 m de espessura na região de Chongzou, e sua parte superior é dominada por calcários grossos com vestígios de quartzo (Lehrmann et al., 2007). Na região de Pingguo, a parte superior da unidade contém camadas de vulcanismos



Figura IV.1: Mapa paleogeográfico da Bacia de Nanpanjiang. Modificado de Lehrmann et al. (2007).

félsicos logo abaixo do Limite Permo-Triássico (Lehrmann et al., 2003). A Formação Dalong é composta por folhelhos de cor escura, cherts, calcários argilosos com vestígios de chert e vestígios de vulcanismo (Lehrmann et al., 2005). A unidade atinge a espessura de 160 m (Lehrmann et al., 2007). A Formação Heshan do Permiano Superior é recoberta pelos carbonatos das Formações Beisi e Majiaoling, do Triássico Inferior, e seus cardumes de oólitos estão concentrados perto das margens norte e sul – indicando que no início do Triássico Inferior, a plataforma tinha baixo relevo (Lehrmann et al., 2007).

Os estratos do Triássico Inferior são dominados pelos carbonatos das Formações Majiaoling e Beisi e pelos depósitos bacinais da Formação Luolou Lehrmann et al., 2007). A Formação Majiaoling varia de 100 m a 130m de espessura no CPP, sendo composta por um calcário acinzentado com baixo teor de argila (< 10%) e com pequenos oólitos. A Formação Beisi atinge 800 m de espessura e é composta por rochas calcárias argilosas (<10%) com grossos intervalalos de oólitos dispostos em pacotes ascendentes, e com concentrações de dolomitas nas partes superiores (Lehrmann et al., 2007). A Formação Luolou varia de 40 m a 538 m e é composta por calcário argiloso laminado de cor preta a cinza-escura (Lehrmann et al., 2007).

IV.2 Área de Estudo

A área de estudo considerada nesta monografia refere-se a duas seções carbonáticas do sul da China, próximas à cidade de Pingguo e possivelmente referentes à seção Taiping da plataforma Chongzuo-Pingguo – e que, segundo Lehrmann et al. (2003), conteria em seu registro o LPT.

Estes afloramentos (que, nesta monografia, serão referidas como seções A e B) (Figura IV.2), foram investigados em trabalho de campo pelo orientador desta monografia, a convite do Dr. Xiaodong Tan (Instituto de Oceanologia do Sul da China (Academia Chinesa de Ciências), e que também contou com a participação dos Drs. Xixi Zhao (Universidade da Califórnia – Santa Cruz, EUA), Yi Wu (Instituto de Oceanologia do Sul da China) e Hao Yang (Universidade de Geociências da China).

O objetivo deste trabalho de campo foi o de se coletar dados de espessura de acamamentos dos dois afloramentos (Figura IV.2), para a avaliação dos possíveis processos periódicos que estariam relacionados à deposição destes, através de estudo cicloestratigráfico por análise de sinais. Neste trabalho, os acamamentos serão referidos como camadas.

Pela observação das seções A e B – que apresentam, respectivamente, espessuras totais de 13,5 m e 22,2 m (Figuras IV.2 e IV.3), foram medidas, respectivamente, 53 e 119 camadas. Foi possível avaliar a presença de subcamadas (Figura IV.4) nas duas seções (contando, respectivamente, 119

camadas para a seção A e 471 camadas para a seção B). Nesta monografia, serão apresentados resultados de análise de sinais cicloestratigráficos para a seção A.



Figura IV.2: Disposição dos afloramentos (seções A e B), referentes à seção Taiping da Plataforma Chongzuo-Pingguo.



Figura IV.3: Detalhes dos afloramentos (seção A, à esquerda; seção B, à direita).



Figura IV.4: Detalhes de camadas de rocha carbonática da seção A (23° 29.993' N; 107° 31.488'E, elevação = 298 m), exibindo 53 camadas e 115 sub-camadas em afloramento na região de Pingguo, província de Guangxi, sul da China, totalizando 13,5 m de espessura. (A): foto de acamamentos, exibindo pronunciada inclinação (40-60 graus), com detalhe para nível possívelmente relacionado ao limite de extinção em massa, pouco abaixo do limite Permo-Triássico; (B): detalhe de acamamentos sucessivos, aonde se pode notar a presença de subcamadas, possivelmente indicativos de processos harmônicos na variabilidade deposicional devido a processos de oscilação do nível do mar; (C): indicação do registro de subcamadas e camadas (acamamento, cada camada e suas respectivas subcamadas foram medidas com o auxílio de uma trena; (E) e (G): série de dados cicloestratigráficos, relacionados aos dados de espessura das subcamadas. A série representada em (E) corresponde à análise de sinais cicloestratigráficos apresentada nesta monografia.

V. Métodos de análise

V.1 Análise de sinais cicloestratigráficos

Schwarzacher, em estudo de 1975, teceu considerações tidas como de grande importância para os estudos de cicloestratigrafia subsequentes (Weedon, 2003). Neste artigo, considerou que a variável que registra a ciclicidade deve ser observada ao longo do tempo, representada por repetições em períodos de tempos iguais, e não apenas relacionada à variação ou repetição de uma litologia – por isto, sugeriu que dados estratigráficos devem ser coletados como séries temporais (Weedon, 2003).

As séries temporais podem ser abordadas de diversas formas e uma das primeiras condutas a se tomar antes da realização de qualquer análise é a de se escolher o domínio do estudo: tempo ou espaço. A motivação para a aplicação da análise espectral neste trabalho é a decodificação dos sinais harmônicos que podem estrar armazenados nos registros sedimentares. A escolha do domínio e do *proxy* de maneira correta pode influenciar diretamente os resultados.

Podemos definir a análise espectral como o processo que decompõe uma série temporal nas frequências que a compõem, sua representação gráfica é o espectro de potências. Podemos fazer uma analogia entre a análise espectral e um prisma: quando um feixe de luz branca atravessa um prisma, a luz é decomposta em um espectro de cores diferentes que estariam escondidas. Este espectro de cores pode ser comparado aos espectros de potências que vamos obter a partir de nossas análises.

V.2 Análise espectral

Muitos métodos de análise espectral são utilizados para várias das áreas de conhecimento (e.g. transformada rápida de Fourier (FFT); método de Blackman-Tukey, método de máxima entropia) – em geral, apoiados na consideração de séries igualmente espassadas no domínio do tempo. Entretanto um dilema frequente em estudos cicloestrátigráficos baseados em análise espectral é a necessidade de utilização de séries incompletas, o que impede a investigação através de ferramentas padrão de analise espectral (Broersen, 2006; Franco, 2007), sendo este um dos problemas para a escolha de um método para este estudo.

Para este tipo de consideração, um dos métodos mais utilizados no cálculo de espectros é a análise de periodogramas (Scargle, 1982; Hernandez, 1999), dentre os quais se destaca a *transformada de Fourier de Lomb-Scargle* (LSFT), que apresenta a vantagem de operar sobre séries temporais

desigualmente espaçadas no domínio do tempo (Lomb, 1976; Scargle, 1982; Schulz & Sttategger, 1997; Kossler *et al.*, 2001; Thong *et al.*, 2004, Franco, 2007). Este processo foi desenvolvido a partir do método de Lomb (1976), que é um estimador de Fourier para dados irregulares, e que transforma apenas os dados disponíveis, e que foi aprimorado e utilizado por Scargle (1982).

Na sua forma final, o periodograma de Lomb-Scargle – método empregado neste trabalho – possibilita o cálculo de um coeficiente de Fourier para cada freqüência desejada, e permite a obtenção da densidade espectral a partir das amplitudes dos ajustes de mínimos quadrados das observações disponíveis (Broersen, 2006). Além disso, é um estimador de boa qualidade se o processo real consiste de uma função periódica com algum ruído estatístico associado. A escolha deste método permite a análise de dados irregularmente espaçados, evitando assim os processos de interpolação, que podem gerar importantes desvios estatísticos. Tais desvios ocorrem uma vez que a interpolação no domínio do tempo altera o espectro de uma série temporal, através do aumento de componentes de baixa freqüência às custas das componentes de alta freqüência (Kossler *et al.*, 2001; Schulz & Mudelsee, 2002) e também pelo fato de dados interpolados não serem estatisticamente independentes.

V.3 Análise tempo-frequência: espectro evolucionário

Sistemas naturais apresentam mudanças ao longo do tempo, a frequência e a magnitude destas variações podem mudar de várias maneiras: lenta, rápida, abrupta ou quase-periódica. Métodos analíticos que rastreiam mudanças tempo-frequência tempo são necessárias para avaliar estes processos (Kodama & Hinnov, 2015).

A análise tempo-frequência ou análise evolucionária – metodologia empregada neste trabalho – possibilita a verificação da estabilidade dos resultados obtidos pela análise espectral e identifica potenciais mudanças nas frequências em função do tempo (Mann & Park, 1999).

Quando a série de dados é longa em comparação à escala da ciclicidade de interesse, então é possível analisar esta série através de vários espectros de subseções e ainda continuar com uma largura de banda suficiente para identificar a ciclicidade de interesse. A análise espectral evolucionária pode ser caracterizada pelo uso de subseções consecutivas ou sobrepostas. Quando as subseções não se sobrepõem, a análise histórica da mudança das frequências do espectro é feita de maneira independente. Quando as subsequências são sobrepostas, a análise histórica é capaz de avaliar as mudanças graduais nas distribuições de potência e frequência (Weedon, 2003). O tamanho das subseções influencia diretamente no resultado que o espectro evolucionário vai gerar: subseções longas podem suavizar altas frequências, e as muito curtas prejudicaram a medidas das baixas frequências (Kodama & Hinnov, 2015).

V.4 Calibração astronômica

Uma grande inovação nas geociências é escala de tempo astronômica (ATS). Esta escala é baseada na estratigrafia forçada pelos ciclos de Milankovitch e é muito bem definida para o Cenozóico e Mesozóico, no entanto, a ATS não foi muito explorada para era Paleozóica pela falta de geocronologia de alta precisão (Wu et al., 2012; Wu et al., 2013).

A calibração astronômica consiste no procedimento de ajustar escala de tempo de uma sucessão sedimentar aos ciclos de Milankovitch através da análise da relação de proporcionalidade dos picos de um espectro de potências (Kruiver *et al.*, 2000; Franco, 2007). Como visto nos capítulos anteriores, os valores de excentricidade (400 ka e 100 ka) se mantiveram estáveis por longos períodos de tempo e são utilizados como metrônomos para este procedimento, tornando-o possível para Cenozóico e Mesozóico, e mesmo para o tempo geológico profundo (Franco, 2007; Wu et al., 2012; Wu et al., 2013).

Berger *et al.* (1992) calcularam os períodos de obliquidade e precessão para tempos pré-Quaternários, e a partir da solução matemática que eles propuseram nós realizados o cálculo para os parâmetros orbitais a 252 Ma (localização temporal da extinção em massa), e concluímos seus valores são de 405 ka, 100 ka, 44.9 ka, 35.6 ka, 21.2 ka e 17.7 ka para excentricidade longa, excentricidade curta, obliquidade longa, obliquidade curta, precessão longa e precessão curta, respectivamente. Os parâmetros orbitais variam dentro de uma razão de proporcionalidade no domínio da frequência e esta razão também é valida quando os dados estão no domínio do tempo (Kruiver *et al.*, 2000; Franco, 2007). A calibração astronômica é realizada quando nós observamos as taxas de proporcionalidade entre as frequências de um espectro de potências no domínio do espaço, associando tais picos espectrais às frequências de Milankovitch - transferindo-os, assim, para o domínio do tempo. Para o período estudado as taxas de proporcionalidade são de 23,1 : 5,7 : 2,5 : 2,0 : 1,2 : 1,0 (Berger et al., 1992).

VI. Resultados e Conclusões

Após a análise espectral de nossas oito séries de dados, nós utilizamos as taxas preditas por Berger et al. (1992) para verificar a presença dos ciclos de Milankovitch em nossos espectros de potência, porém obtivemos apenas dois espectros favoráveis: os espectros de altura estratigráfica e o metronômico das camadas da série A.

Baseando-se no espectro de potências gerado com a série de Altura estratigráfica das camadas da seção A (Fig. VI.1) e utilizando as taxas de proporcionalidades preditas por Berger et al (1992), concluímos que esta seção apresenta uma forte evidência para as frequências de Milankovitch. O valor do primeiro pico presente em nosso espectro, 256 cm, é muito próximo da média das excentricidades encontradas por Wu et al. (2013) na seção Meishan (~ 240 cm). O pico de 256 cm de nosso espectro foi utilizado como ponto de ancoragem para a calibração astronômica associado à excentricidade curta (100 ka), com pico espectral acima do limite de confiança de 90%. Para esta série de dados, não foi encontrado o registro de excentricidade de longo período, de 405 ka – o que pode ser atribuído à pequena espessura da seção A (= 13,5 m), frente ao comprimento de onda esperado para esta periodicidade ((23,1×2,56) / 5,7 ≈ 10,4 m) – portanto, insuficiente para registrar mais de um destes ciclos de longo período.

Com base nas taxas preditas por Berger et al. (1992) e utilizando o pico de 256 cm como ponto de ancoragem, esperava-se que os sinais de obliquidade de 44,4 ka e 35,2 ka pudessem ser sugestivos de picos espectrais de valores próximos a 115,1 cm e 91,1 cm, respectivamente. Isto pode explicar o a presença de um pico relativamente largo, de 94,2 cm (Fig. VI.1), acima do nível de confiança de 95%, e que poderia ser produto de sobreposição destes dois sinais. O pico espectral de 55,9 cm, acima do nível de confiança de 90%, equivaleria ao sinal de precessão 21,2 ka – pelas taxas preditas, espera-se um valor bem próximo, em torno de 54,2 cm.

Para comparação com o espectro de potências discutido, e para avaliar a persistência e a variabilidade dos sinais espectrais sugeridos ao longo da sucessão, foi avaliado o espectro evolucionário para esta série de dados (Fig. VI.1). Fica evidente pelo espectro evolucionário, a persistência ao longo de todo o registro sedimentar da seção A de um sinal próximo ao sugerido anteriormente para os ciclos de obliquidade. Nota-se também que, na maior parte da sucessão, um sinal bastante intenso e estável, e equivalente ao ciclo de excentricidade de menor período, pode ser verificado.

Os resultados do espectro de potencias da série metronômica das camadas da seção A foram interpretados com base nas taxas preditas por



Figura VI.1: Espectro de potência de altura estratigráfica das camadas da seção A e espectro evolucionário da mesma série de dados.

Berger et al. (1992), e com base nos resultados obtidos no espectro de potencias anterior (Fig. VI.1). Enquanto o espectro de potencias de altura estratigráfica nos fornece informações referentes à taxa de sedimentação, o espectro de potências da série metronômica nos fornece informações referentes ao número de camadas em função do tempo.

O espectro de potencias da série metronômica das camadas da seção A (Fig. VI.2 (B)) apresenta um pico com o valor de 10,4 camadas, este pico foi relacionado ao pico de 256 cm do espectro de potencias anterior, nos levando a concluir que durante o processo de sedimentação da seção A, 10,4 camadas foram depositadas a cada 100 ka. Este resultado nos levou à conclusão de outros fatos: a seção A possui o total de 53 camadas e 10,4 camadas foram depositadas a cada 100 ka, então, pode-se sugerir que a seção A equivaleria a um tempo de sedimentação ligeiramente superior a 500 ka.

Os cálculos realizados baseados nas taxas preditas por Berger et al. (1992) nos deram a previsão para os valores dos ciclos de obliquidade e precessão: 4.8 camadas para o ciclo de 44.4 ka, 3.7 camadas para o ciclo de 35.4 ka, 2.2 camadas para o ciclo de 21.1 ka e 1.8 camadas para o ciclo de 17.7 ka. O nosso espectro de potências apresenta 3.6, 2.9, 2.31 e 2.1 acima do nível de confiança de 80%, um pico de 4.5 também está presente em nosso espectro, porém abaixo deste nível de confiança (Fig. VI.2).

Levando em consideração que os ciclos de obliquidade estavam representados por apenas um pico, podemos considerar que o pico que representa a obliquidade é o que vale 3.6 camadas, nos levando a conclusão que um ciclo de obliquidade acontece a cada 3.6 camadas. A precessão observada no espectro de potências da série de altura estratigráfica pode ser associada ao pico 2.3 camadas.

Como discutido no capitulo III, Wu e colaboradores (Wu et al., 2012; 2013) realizaram estudos em sucessões carbonáticas relacionáveis em termos de geologia local com a apresentada nesta monografia. Wu et al. (2012) observou ciclos básicos que variavam de 6-20 cm e os relacionaram a ciclos sub-orbitais, e adicionaram a informação de que grupos de quatro a sete ciclos básicos constituiriam um ciclo de precessão, variando entre 60 cm e 80 cm. Os resultados que eles obtiveram a respeito dos ciclos sub-orbitais não foram observados em nossas análises, devido à resolução da nossa série de dados, mas os ciclos orbitais foram observados e seus valores ficaram muito próximos dos valores que observaram.

De acordo com nossos resultados, podemos concluir que nossas análises podem contribuir para a confirmação da validade da teoria forçagem astronômica para o Paleozóico:



Figura VI.2: (A) espectro de potencias de altura estratigráfica das camadas da seção A; (B) espectro de potencias da série metronômica de camadas da seção A, onde n é o número de camadas.

- Os ciclos de Milankovitch são capazes de alterar a radiação solar em relação ao nosso planeta, a ponto de influenciar nos ciclos deposicionais;
- A calibração astronômica pode ser uma ferramenta de alta precisão e muito conveniente para estimar o período de deposição e a taxa de sedimentação de seções sedimentares. De acordo com nossas analises a série A foi depositada ao longo de um período ligeiramente superior a 500 ka;
- (3) A modelagem astronômica pode representar uma ferramenta de grande utilidade para o entendimento de mudanças climáticas de larga escala de tempo. Segundo Berger (1992), o Quaternário foi marcado por variações entre períodos interglaciais e glacias, com periodicidades em torno de 100 ka. Essas mudanças são razoavelmente bem explicadas pelos ciclos de Milankovitch. Como visto neste projeto, os ciclos de Milankovitch também afetaram os padrões deposicionais do Limite Permo-Triássico;
- (4) Os sinais espectrais encontrados para os dados de espessura de acamamentos da seção A são bastante compatíveis com os períodos orbitais sugeridos para o Permo-Triássico através do modelo astronômico de Berger et al. (1992), em que se leva em conta processos de dissipação por marés e interação com planetas vizinhos – fazendo, assim, com que os ciclos de obliquidade e precessão se alterem significativamente com o tempo;
- (5) A avaliação do passado geológico é essencial para a compreensão dos processos que ocorrem atualmente, e para a avaliação dos processos futuros. Ao investigarmos cada vez mais e melhor o comportamento climático do nosso planeta, torna-se possível prever a maneira que o clima vai se comportar futuramente, para a criação de alternativas e estratégias de sobrevivência para os seres humanos.

VII. Bibliografia

- ALLEY, R. B. The Younger Dryas Cold Interval As Viewed from Central Greenland. **Quaternary** Science Reviews, v. 19, n. 1, p. 213-226, (2000).
- ARAÚJO, M. A. A Evolução do Litoral Em Tempos Históricos: a Contribuição da Geografia Física. (2002).
- BERGER, A. L. Support For The Astronomical Theory Of Climatic Change. **Nature**, v. 269, n. 5623, p. 44-45, (1977).
- BERGER, A., LOUTRE, M. F., Milankovitch Theory And Paleoclimate. In: Elias S. A. (Ed.). Glaciation Causes. Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, v. 4. P. 1017-1022. (2007).
- BERGER, A; LOUTRE, M; LASKAR, J. Stability Of The Astronomical Frequencies Over The Earth's History For Paleoclimate Studies. **Science**, v. 255, n. 5044, p. 560-566, (1992).
- BOYLE, R.A.; LENTON, T.M.; WILLIAMS, H.T.P. Neoproterozoic 'Snowball Earth'Glaciations And The Evolution Of Altruism. **Geobiology**, v. 5, n. 4, p. 337-349, (2007).
- BROECKER, W. S., DENTON, G. H., EDWARDS, R. L., CHENG, H., ALLEY, R. B., & PUTNAM, A. E. Putting The Younger Dryas Cold Event Into Context. Quaternary Science Reviews, v. 29, n. 9, p. 1078-1081, (2010).
- BROERSEN, Piet MT. Automatic Spectral Analysis With Missing Data. Digital Signal Processing, v. 16, n. 6, p. 754-766, (2006).
- CLARKSON, M. O., KASEMANN, S. A., WOOD, R. A., LENTON, T. M., DAINES, S. J., RICHOZ, S., ... & TIPPER, E. T. Ocean Acidification And The Permo-Triassic Mass Extinction. Science, v. 348, n. 6231, p. 229-232, (2015).
- CRONIN, T. M. HAYO, K., THUNELL, R. C., DWYER, G. S., SAENGER, C., & WILLARD, D. A. The Medieval Climate Anomaly And Little Ice Age In Chesapeake Bay And The North Atlantic Ocean. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 297, n. 2, p. 299-310, (2010).
- DEBRET, M. SEBAG, D., CROSTA, X., MASSEI, N., PETIT, J. R., CHAPRON, E., & BOUT-ROUMAZEILLES, V. Evidence From Wavelet Analysis For A Mid-Holocene Transition In Global Climate Forcing. Quaternary Science Reviews, v. 28, n. 25, p. 2675-2688, (2009).
- DERGACHEV, V. Environmental Changes On Centennial To Millennial Time Scales From Natural Archives Workshop Astrobiology In Russia, St.Petersburg, Russia (2002).
- EINSELE, G., RICKEN, W., SEILACHER, A. Cycles and Events In Stratigraphy (1991).
- ERWIN, D. H. The Permo-Triassic Extinction. Shaking the Tree: Readings from Nature in the History of Life. (1994).
- FISCHER, A. G., DE BOER, P. L.; PREMOLI SILVA, I.Cyclostratigraphy. *In*: Cretaceous resources, events and rhythms. Kluwer Dordrecht. P. 139-172, (1990).

- FRANCO, D.R., Magnetoestratigrafia e Análise Espectral de Ritmitos Permocarboníferos da Bacia do Paraná: Influências dos Ciclos Orbitais no Regime Deposicional. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 192 p. (2007).
- FREITAS, J. T. R. Ciclos Deposicionais Evaporiticos Da Bacia de Santos: Uma Análise Cicloestratigrafica A Partir De Dados De Dois Poços E Traços De Sísmica. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul. Dissertação (Mestrado). (2006).
- GALFETTI, T., BUCHER, H., MARTINI, R., HOCHULI, P. A., WEISSERT, H., CRASQUIN-SOLEAU, S., BRAYARD, A., GOUDEMAND, N., BRÜHWILER, T. & GUODUN, K.. Evolution Of Early Triassic Outer Platform Paleoenvironments In The Nanpanjiang Basin (South China) And Their Significance For The Biotic Recovery. Sedimentary Geology, v. 204, n. 1, p. 36-60, (2008).
- GARCÍA-RUIZ, J. M., PALACIOS, D., GONZÁLEZ-SAMPÉRIZ, P., DE ANDRÉS, N., MORENO, A., VALERO-GARCÉS, B., & GÓMEZ-VILLAR, A. Mountain Glacier Evolution In The Iberian Peninsula During The Younger Dryas. Quaternary Science Reviews, v. 138, p. 16-30, (2016).
- GHIL, M., ALLEN, M. R., DETTINGER, M. D., IDE, K., KONDRASHOV, D., MANN, M. E., ROBERTSON, A.W., SAUNDERS, A., TIAN, Y., VARADI, F. & YIOU, P et al. Advanced Spectral Methods For Climatic Time Series. **Reviews of Geophysics**, v. 40, n. 1, (2002).
- GOLDEMBERG, J. & LUCON, O. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento.(2008).
- HAYS, J. D., Hays, J. D., Imbrie, J., & Shackleton, N. J. Variations In The Earth's Orbit: Pacemaker Of The Ice Ages. American Association for the Advancement of Science (1976).
- HERNANDEZ, G. Time series, periodograms, and significance, *J. Geophys. Res.* 104 n. A5 10355-10368, (1999).
- HINNOV, L. A. Cyclostratigraphy And Its Revolutionizing Applications In The Earth And Planetary Sciences. **Geological Society of America Bulletin**, v. 125, n. 11-12, p. 1703-1734, (2013).
- HINNOV, L. A. New Perspectives On Orbitally Forced Stratigraphy. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 28, n. 1, p. 419-475, (2000).
- HOFFMAN, P. F.; KAUFMAN, A. J.; HALVERSON, G. P. & SCHARAG, D. P. A Neoproterozoic Snowball Earth. **Science**, v. 281, n. 5381, p. 1342-1346, (1998).
- IVANOV, A. V., HE, H., YAN, L., RYABOV, V. V., SHEVKO, A. Y., PALESSKII, S. V., & NIKOLAEVA, I. V. Siberian Traps Large Igneous Province: Evidence For Two Flood Basalt Pulses Around The Permo-Triassic Boundary And In The Middle Triassic, And Contemporaneous Granitic Magmatism. Earth-Science Reviews, v. 122, p. 58-76, (2013).
- KODAMA, K.P., HINNOV, L.A. Rock Magnetic Cyclostratigraphy. Wiley Blackwell (2015).
- KÖSSLER, P. HERRLE, J.O., APPEL, E., ERBACHER, J., HEMLEBEN, C. Magnetic records of climatic cycles from mid-Cretaceous hemipelagic sediments of the Vocontian Basin, SE France. **Cretaceous Research**, v. 22, n. 3, p. 321-331, (2001).
- KRUIVER, P.P., DEKKERS, M.J., LANGEREIS, C.G. Secular Variation In Permian Red Beds From Dôme De Barrot, SE France. Earth and Planetary Science Letters, v. 179, n. 1, p. 205-217, (2000).

- LASKAR, J. The Chaotic Motion Of The Solar System: A Numerical Estimate Of The Size Of The Chaotic Zones. **Icarus**, v. 88, n. 2, p. 266-291, (1990).
- LASKAR, J., ROBUTEL, P., JOUTEL, F., GASTINEAU, M., CORREIA, A. C. M., & LEVRARD,
 B. A Long-term Numerical Solution For The Insolation Quantities Of The Earth. Astronomy & Astrophysics, v. 428, n. 1, p. 261-285, (2004).
- LEHRMANN, D.J., ENOS, P., PAYNE, J. L., MONTGOMERY, P., WEI, J., YU, Y., XIAO, J. & ORCHARD, M. J. Permian and Triassic Depositional History Of The Yangtze Platform And Great Bank of Guizhou In The Nanpanjiang Basin Of Guizhou And Guangxi, South China. **Albertiana**, v. 33, n. 1, p. 149-168, (2005).
- LEHRMANN, D.J., PAYNE, J. L., FELIX, S. V., DILLETT, P. M., WANG, H., YU, Y., & WEI, J. Permian–Triassic Boundary Sections From Shallow-Marine Carbonate Platforms Of The Nanpanjiang Basin, south China: implications for oceanic conditions associated with the end-Permian Extinction And Its Aftermath. **Palaios**, v. 18, n. 2, p. 138-152, (2003).
- LEHRMANN, D.J., PAYNE, J. L., PEI, D., ENOS, P., DRUKE, D., STEFFEN, K., ZHANG, J., WEI, J., ORCHARD, MJ. & ELLWOOD, B. Record Of The End-Permian Extinction And Triassic Biotic Recovery In The Chongzuo-Pingguo Platform, Southern Nanpanjiang Basin, Guangxi, South China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 252, n. 1, p. 200-217, (2007).
- LEHRMANN, D.J., WEI, J & ENOS, P. Controls On Facies Architecture Of A Large Triassic Carbonate Platform: The Great Bank Of Guizhou, Nanpanjiang Basin, South China. Journal of Sedimentary Research, v. 68, n. 2, (1998).
- Li, Y., Li. Y., HARBOR, J., LIU, G., YI, C & CAFFEE, M. Cosmogenic 10 Be Constraints On Little Ice Age Glacial Advances In The Eastern Tian Shan, China. Quaternary science reviews, p. 105-118, (2016).
- LOMB, N.R. Least-Squares Frequency Analysis Of Unequally Spaced Data. Astrophysics and space science, v. 39, n. 2, p. 447-462, (1976).
- LOUTRE, M. Clues From MIS 11 To Predict The Future Climate–a Modelling Point Of View. Earth and Planetary Science Letters, v. 212, n. 1, p. 213-224, (2003).
- MILANKOVITCH, M. Kanon Der Erdbestrahlungen Und Seine Anwendung Auf Das Eiszeitenproblem. Royal Serbian Acad. Spec. Pub.,132 Sect. Math. Nat. Sci., 33, Beograd: Ko⁻⁻ ninglich Serbische Akademie. (1941). Republicado em inglês :Canon Of Earth's Insolation And Its Application To The Ice-Age Problem (1998).
- MILLER, G. H., GEIRSDÓTTIR, Á., ZHONG, Y., LARSEN, D. J., OTTO-BLIESNER, B. L., HOLLAND, M. M., BAILEY, D.A., REFSNIDER, K.A., LEHMAN, S.L., SOUTHON, J.R. & ANDERSON, C. Abrupt Onset Of The Little Ice AgeTriggered By Volcanism And Sustained By Sea-Ice/Ocean Feedbacks. Geophysical Research Letters, v. 39, n. 2, (2012).
- PERLMUTTER, M.A. & AZAMBUJA, F.N.C. Cyclostratigraphy. In: KOUTSOUKOS, Eduardo AM (Ed.). Applied stratigraphy. Kluwer Academic Publishers: Netherlands, p. 303-340, (2004).
- PINTER, N., SCOTT, A. C., DAULTON, T. L., PODOLL, A., KOEBERL, C., ANDERSON, R. S., & ISHMAN, S. E. The Younger Dryas Impact Hypothesis: A Requiem. Earth-Science Reviews, v. 106, n. 3, p. 247-264, 2011.

- ROHLING, E., MAYEWSKI, P., ABU-ZIED, R., CASFORD, J., & HAYES, A. Holocene Atmosphere-Ocean Interactions: Records From Greenland And The Aegean Sea. Climate Dynamics, v. 18, n. 7, p. 587-593, (2002).
- SANTOS, F. D. A física Das Alterações Climáticas. Gazeta de Física, v. 30, n. 1, p. 48-57, (2007).
- SCARGLE, J.D. Studies In Astronomical Time Series Analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. The Astrophysical Journal, v. 263, p. 835-853, (1982).
- SCHULZ, M. BERGER, W. H., SARNTHEIN, M. & GROOTES, P. M. Amplitude Variations of 1470-Year Climate Oscillations During the Last 100,000 Years Linked to Fluctuations of Continental Ice Mass. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 22, p. 3385-3388, (1999).
- SCHULZ, M. STATTEGGER, Karl. SPECTRUM: Spectral Analysis of Unevenly Spaced Paleoclimatic Time Series. **Computers & Geosciences**, v. 23, n. 9, p. 929-945, (1997).
- SCHWARZACHER, W. Repetitions And Cycles In Stratigraphy. **Earth-Science Reviews**, v. 50, n. 1, p. 51-75, (2000).
- SCHWARZACHER, W. Cyclostratigraphy and The Milankovitch Theory. Elsevier, (1993).
- SILVA, J. G. R. Estudo De Cicloestratigrafia Nos Depósitos Eopermianos Do Grupo Itararé, Bacia Do Paraná, Nos Estados De Santa Catarina E Rio Grande Do Sul, Baseado Em Dados De Testemunho E De Perfis De Raios Gama. (2001).
- SILVA, R. W. C.; PAULA, B. L. Causa Do Aquecimento Global: Antropogênica Versus Natural. **Terra e Didática**, v. 5, n. 1, p. 42-49, (2009).
- STRASSER, A., HILGEN, F. J.; HECKEL, P. H. Cyclostratigraphy-Concepts, Definitions and applications. **Newsletters on Stratigraphy**, v. 42, n. 2, p. 75-114, (2006).
- THOMSON, D. J. Spectrum Estimation And Harmonic Analysis. **Proceedings of the IEEE**, v. 70, n. 9, p. 1055-1096, (1982).
- THONG, T., MCNAMES, J., ABOY, M. "Lomb-Wech Periodogram for Non-Uniform Sampling". *In:* Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, San Francisco, USA, pp. 271-274, (2004).
- USOSKIN, I. G.; MURSULA, K. Long-term solar cycle evolution: review of recent developments. **Solar Physics**, v. 218, n. 1-2, p. 319-343, (2003).
- VINCENT, W. F., MUELLER, D., VAN HOVE, P., & HOWARD-WILLIAMS, C. Glacial Periods On Early Earth And Implications For The Evolution Of Life. In: Origins. Springer Netherlands. P. 483-501, (2004).
- WEEDON, G.P., Time-Series Analysis And Cyclostratigraphy Examining Stratigraphic Records Of Environmental Cycles, Cambridge University Press, Cambridge (2003).
- WIGNALL, P. B.; TWITCHETT, R. J. Oceanic Anoxia And The End Permian Mass Extinction. Science, v. 272, n. 5265, p. 1155, (1996).
- WU, H., ZHANG, S., FENG, Q., JIANG, G., LI, H., & YANG, T. Milankovitch And sub-Milankovitch Cycles Of The Early Triassic Daye Formation, South China And Their

Geochronological and Paleoclimatic Implications. **Gondwana Research**, v. 22, n. 2, p. 748-759, (2012).

- WU, H., ZHANG, S., HINNOV, L. A., JIANG, G., FENG, Q., LI, H., & YANG, T. Time-Calibrated Milankovitch Cycles For The Late Permian. **Nature Communications**, v. 4, (2013).
- YIN, H. YIN, H., FENG, Q., BAUD, A., XIE, S., BENTON, M. J., LAI, X., & BOTTJER, D. J. The Prelude Of The End-Permian Mass Extinction Predates A Postulated Bolide Impact. International Journal of Earth Sciences, v. 96, n. 5, p. 903-909, (2007).