

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARITSA KANTIKAS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA PERIODICIDADE DAS EXTINÇÕES EM  
MASSA

CURITIBA

2013

MARITSA KANTIKAS

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ACERCA DA PERIODICIDADE DAS EXTINÇÕES EM  
MASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Ciências Biológicas da  
Universidade Federal do Paraná para obtenção do  
grau de Bacharel.

Orientadora: Cristina Silveira Vega.

Co-orientador: Robson Tadeu Bolzon.

CURITIBA

2013

## AGRADECIMENTOS

A todos os professores que conheci – e mais ainda aos que, de fato, me conheceram. As professoras de Biologia dos tempos de colégio, que muito me influenciaram na escolha do curso, e aos professores, funcionários e demais alunos que, já no ambiente acadêmico, me deram nortes e lições valiosas (de como proceder – ou não!).

A professora Cristina Silveira Vega e ao professor Robson Tadeu Bolzon pela oportunidade, orientação, apoio e confiança necessários para realizar e concluir este trabalho, e a banca examinadora por dispor de seu tempo e atenção para com o mesmo.

Aos alunos que por mim passaram na monitoria, por despertarem em mim anseios e vontades novas, até então ignoradas, ou mesmo rechaçadas.

Aos alunos, colegas e amigos fora do ambiente da universidade (inclusive – e, em muitos momentos, principalmente – os relacionados ao trabalho), pela compreensão, ombros, risadas, tempo e trocas diárias de experiências. Em particular a amiga do colégio, de nome “exótico” e personalidade admirável e forte, e ao amigo que surgiu aos 47 do segundo tempo, que, dentre muitas coisas, me mostrou uma nova maneira de entender o que é “ser reativa”.

Aos colegas e (mais ainda aos) amigos feitos durante os anos na universidade, pelas mãos estendidas nos momentos em que precisei, e por me ajudarem a construir e consolidar não somente conhecimento, mas também memórias importantes; obrigada por terem entrado na minha vida, e por terem me permitido entrar nas suas.

A Vanessa Zulkiewicz, amiga essencial e única, que encontrei já nas primeiras semanas de curso, e que, de alguma forma, levarei comigo pro resto da vida; sem ela o aprendizado e as conquistas não teriam sido metade do que foram.

A bióloga, secretária do curso e amiga Rosane Cavet Martins, por seus ouvidos, disponibilidade, solicitude e paciência sem fim.

E, por fim, àqueles que considero como “minha família”, por, apesar das dificuldades e “dos pesares”, compreenderem, aceitarem e apoiarem minhas escolhas, e vibrarem, tanto quanto eu, com minhas vitórias – especialmente a “mulher da minha vida”, Kristina Kantikas.

*“Extinction is the rule.*

*Survival is the exception.”*

(Carl Sagan)

## RESUMO

Extinções de espécies, e, em casos potencialmente mais severos, de gêneros e famílias inteiras, são objeto de estudo em diferentes áreas, tais como a Botânica, a Zoologia, a Ecologia e a Paleontologia. As chamadas extinções em massa são caracterizadas por alguns parâmetros, dentre eles a eliminação de no mínimo 75% de todas as espécies, em intervalos de tempo considerados relativamente curtos. As causas apontadas para estes eventos são terrestres, extraterrestres, e, em alguns casos, a conjunção de ambas. O presente trabalho revisou e reuniu informações a respeito das extinções em massa e dos momentos em que as mesmas ocorreram, das periodicidades de ocorrência destes fenômenos apontadas por alguns autores, além de possíveis causas e efeitos dos mesmos, a partir de publicações científicas e da base de dados ISI Web Of Knowledge. A literatura consultada cita, de maneira abundante, porém nem sempre consensual, a ocorrência de cinco grandes extinções em massa durante o Éon Fanerozoico, no final do Ordoviciano, no final do Devoniano, no final do Permiano, no final do Triássico, e, mais recentemente, no final do Cretáceo. Além destes cinco grandes picos de extinção, diversos autores apontam outros, de impacto comparativamente menor – como os do Plioceno e do Pleistoceno –, os quais também são utilizados em pesquisas que buscam apontar se de fato há uma regularidade temporal para tais eventos. O trabalho mais citado a esse respeito na base de dados utilizada, desde sua publicação, e que parece ser o mais impactante na comunidade científica, devido ao grande número de citações, e polêmicas críticas e defesas, é o de Raup & Sepkoski, de 1984. Este trata da possibilidade de existência de ciclos de aproximadamente 26 milhões de anos, a partir de um modelo astrofísico. Além deste, existem outros modelos, que levam em consideração diferentes dados e abordagens metodológicas. Tais estudos não apresentam ideias conclusivas e/ou definitivas a respeito da existência de periodicidade, mas fornecem informações e ferramentas altamente aplicáveis nas diversas áreas da ciência, inclusive na detecção de uma possível nova extinção em massa.

**Palavras-chave:** Extinções. Extinções em massa. Fanerozoico. Periodicidade. Ciclos.

## ABSTRACT

Extinctions of species, and, in potentially more severe cases, of genera and families, are object of study in different fields, such as Botany, Zoology, Ecology, and Paleontology. The so called mass extinctions are characterized by a few parameters, including the elimination of at least 75% of all species, in time intervals considered relatively short. The given causes of these events are terrestrial, extraterrestrial, and, in some cases, a combination of both. This paper reviewed and gathered information about the mass extinctions and the moments in which they occurred, the periodicities of occurrence of these phenomena pointed by some authors, and their possible causes and effects, from scientific publications and the ISI Web of Knowledge database. The consulted literature cites, abundantly, but not always consensually, the occurrence of five major mass extinctions during the Phanerozoic Eon, at the end of the Ordovician, at the end of the Devonian, at the end of the Permian, at the end of the Triassic, and more recently, at the end of the Cretaceous. In addition to these five major peaks of extinction, several authors point others, of comparatively minor impact—as the ones in the Pliocene and Pleistocene—which are also used in researches that seek to point out if there is indeed a temporal regularity for such events. The most cited work in this regard in the database used, since its publication, which also seems to be the most impactful in the scientific community, due to the large number of citations, polemical critiques and defenses, is the one of Raup & Sepkoski, from 1984. It discusses the possibility of existence of cycles of approximately 26 million years, from an astrophysicist model. Besides this, there are other models, which take into account different data and methodological approaches. These studies show no conclusive and/or definitive ideas about the existence of periodicity, but provide information and tools highly applicable in many areas of science, including in the detection of a possible sixth mass extinction.

**Keywords:** Extinctions. Mass extinctions. Phanerozoic. Periodicity. Cycles.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – TABELA CRONOESTATIGRÁFICA SIMPLIFICADA.....	14
FIGURA 2 – TROCAS E INTERVALOS DOS SUPERCICLOS.....	29

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>CENÁRIO ATUAL DAS REFERÊNCIAS NA BASE DE DADOS ISI WEB OF KNOWLEDGE</b> .....	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>AS EXTINÇÕES EM MASSA DO FANEROZOICO</b> .....	<b>12</b>
4.1	EXTINÇÃO DO FINAL DO ORDOVICIANO .....	14
4.2	EXTINÇÃO DO FINAL DO DEVONIANO .....	15
4.3	EXTINÇÃO DO FINAL DO PERMIANO .....	16
4.4	EXTINÇÃO DO FINAL DO TRIÁSSICO .....	17
4.5	EXTINÇÃO DO FINAL DO CRETÁCEO .....	17
4.6	QUANTO AOS DEMAIS PICOS DE EXTINÇÃO.....	18
<b>5</b>	<b>PERIODICIDADE DAS EXTINÇÕES</b> .....	<b>20</b>
5.1	CICLOS DE HATFIELD & CAMP (1970) – 80-90 MILHÕES DE ANOS.....	20
5.2	CICLOS DE FISCHER & ARTHUR (1977) – 32 MILHÕES DE ANOS.....	21
5.3	CICLOS DE NAPIER & CLUBE (1979) – 50 MILHÕES DE ANOS .....	21
5.4	CICLOS DE RAUP & SEPKOSKI (1984) – 26 MILHÕES DE ANOS .....	22
5.5	CICLOS DE WITHMIRE & JACKSON (1984) E DAVIS, HUT & MULLER (1984) – APROXIMADAMENTE 28 MILHÕES DE ANOS.....	26
5.6	SUPERCICLOS DE FISCHER (1984) – 300 MILHÕES DE ANOS.....	27
5.7	CICLOS DE RAMPINO & STOTHERS (1984) – 33 MILHÕES DE ANOS .....	30
5.8	CICLOS DE WHITMIRE & MATESE (1985) – APROXIMADAMENTE 28 MILHÕES DE ANOS .....	30
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>32</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As extinções – inclusive as grandes, que dizimaram, de uma só vez, números consideráveis de espécies – são objeto de estudo de várias áreas, dentre elas a Ecologia, a Geologia e a Paleontologia. Elas podem se referir ao desaparecimento de populações de uma espécie em localidades específicas, ou, até mesmo, da espécie como um todo. A extinção pode ser ainda, de maneira mais agravada, de gêneros ou famílias inteiras.

Segundo Twitchett (2006), os estudos acerca das extinções em massa aumentaram muito desde a década de 1980, com maior foco na última, no final do Cretáceo; no entanto, de acordo com o mesmo, a tendência é de que os estudos sobre o evento do Permiano superem os deste último, que possivelmente já atingiram seu pico de publicações.

Além de variações quanto aos conceitos empregados para definir uma extinção como de massa e/ou ideias defendidas, alguns autores (por exemplo, BENTON, 1995b) citam que a qualidade do registro fóssil também tem efeitos muito importantes nos estudos (visto que nem tudo pode ser ou foi – bem – preservado, que retrabalhamentos podem ter ocorrido, dentre outros fatores que prejudicam e dificultam o levantamento de dados).

Vários estudos apontam, inegavelmente, para a existência de uma periodicidade quando se refere às grandes extinções. As causas, assim como o suposto tempo de duração de um ciclo (sendo este demarcado por um grande evento de extinção e o seguinte), são alvos de muitas pesquisas e discussões entre os estudiosos. Rohde & Muller (2005) elaboraram um estudo que aliou, além das descobertas anteriores (principalmente de J.J.Sepkoski Jr., na década de 80), ferramentas/cálculos estatísticos, e que apontou que é possível que tenham ocorrido ciclos, sendo estes de aproximadamente 62 milhões de anos, em oposição aos intervalos de aproximadamente 26 milhões de anos de Sepkoski (1989). Mas estes são apenas dois exemplos de resultado aos quais os pesquisadores chegaram, ao utilizarem metodológicas diversas.

Os estudos já realizados são abrangentes e dispersos, o que evidencia a necessidade de revisar a bibliografia, a fim de sintetizar informações acerca das causas mais apontadas para tais extinções, se há uma periodicidade definida para as mesmas.

O presente trabalho visou fazer um levantamento bibliográfico a respeito das extinções em massa e reunir informações relacionadas a esta temática. A literatura consultada cita a ocorrência de cinco grandes extinções em massa no Éon Fanerozoico, que ocorreram ao final do Ordoviciano, ao final do Devoniano, ao final do Permiano, ao final do Triássico, e a mais recente teria sido a do final do Cretáceo. Além destes cinco grandes picos de extinção existem outros, de impacto comparativamente menor, que serão citados na seção destinada às extinções neste trabalho.

A seguir serão discutidos quais são os critérios mais frequentemente apontados para se definir um evento de extinção como de massa; se apresentará uma breve descrição do status geográfico (paleogeografia) e climático (paleoclimatologia) da Terra nos momentos em que ocorreram estas extinções em massa; quais foram as causas mais apontadas para tais eventos e as conseqüências para as formas de vida; quais são as períodos apontados até o presente momento, e as críticas ou defesas feitas às mesmas; e, por fim, se discutirá se as pesquisas apontam para uma real periodicidade – ou seja, apontam para a existência de ciclos temporais definidos e confiáveis.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A construção deste levantamento bibliográfico foi feita com base em informações obtidas de livros (disponíveis, principalmente, nas bibliotecas de Ciência e Tecnologia e de Ciências Biológicas da Universidade Federal do Paraná) e artigos científicos da Internet, e em dados e estatísticas obtidos no ISI Web of Knowledge.

O texto foi dividido em seções, que contemplam uma revisão acerca dos eventos de extinção em massa já documentados, informações sobre os ciclos periódicos de extinção e algumas críticas e defesas dos mesmos, e, por fim, uma seção de considerações finais, discutindo se há de fato inclinação para a idéia da existência de periodicidade dos eventos de extinção em massa.

Existem divergências entre os autores quanto aos limites dos eventos de extinção, portanto, optou-se por considerar apenas o final dos períodos. As idades que por ventura foram atualizadas estão de acordo com a Tabela Cronoestatigráfica Internacional (COHEN, FINNEY & GIBBARD, 2013).

### 3 CENÁRIO ATUAL DAS REFERÊNCIAS NA BASE DE DADOS ISI WEB OF KNOWLEDGE

A partir do site do Institute for Scientific Information (ISI) Web of Knowledge há como acessar páginas de bases de dados como a Web of Science (em tradução livre, “rede da ciência”), que são mantidas pela companhia Thomson Reuters (grande mundialmente, e detentora de vários meios de comunicação, como jornais, sites, dentre outros, segundo o próprio site). A Web Of Science funciona como uma grande base de dados científicos, onde é possível localizar artigos específicos e dados a respeito dos mesmos, além de outros dentro do mesmo tema. É possível ainda verificar onde, quando e por quem foram publicados tais artigos, além de muitos outros recursos. Esta base de dados é amplamente utilizada pela comunidade científica.

Ao pesquisar os tópicos “mass extinction” nas bases de dados disponíveis na Web of Knowledge chegamos ao número aproximado, no dia 16 de maio de 2013, de 12.339 publicações científicas indexadas que tratam deste tema. Ao refinar a pesquisa utilizando o filtro da página para a área da paleontologia, o número reduziu para 2.088. No entanto, ao pesquisar somente o tópico “extinction”, sem qualquer filtro, o número aproximado é de 104.373 publicações.

Os números caem ainda mais ao pesquisarmos os tópicos “mass extinction AND periodicity” (sem filtros): 122. A diferença de resultados entre os dados chama a atenção, e pode ocorrer devido a diversos fatores, ou até mesmo devido à combinação dos mesmos, como: déficit, indicando necessidade de estudos que levem em consideração estas temáticas, combinadas ou não; algumas publicações podem não estar ainda indexadas nestas bases de dados disponíveis – apesar do fato de que a pesquisa se estende para publicações desde 1864 até 2013.

Ao inserir os tópicos “mass extinction AND periodicity” e restringir a pesquisa para os últimos dez anos, 103 trabalhos diversos (até o dia 06 de julho de 2013) que tratam destes temas foram publicados, mas o mais citado é o de Benton, de 1995(a) – rica fonte de dados para o presente trabalho.

Dentre os 122 artigos anteriormente citados, a publicação “Keeping time with mass extinctions”, de David Jablonski, é a mais antiga indexada na base de dados (1984), e o artigo “Diversification and extinction in the history of life”, de Michael J. Benton, é, atualmente, o mais citado – 276 vezes, desde sua publicação, em 1995

(18 anos atrás). No entanto, os registros bibliográficos indicam que o assunto já havia sido tratado anteriormente, por exemplo, por Fischer e Arthur, em 1977 (RAUP & SEPKOSKI, 1984), mas este trabalho não se encontra indexado nesta base.

Por fim, ao verificar os tópicos “sixth mass extinction”, existem 38 artigos indexados na base de dados, sendo o mais antigo deles de 1994, e o mais recente de 2012 (até o momento) – o relativamente baixo número de citações parece se relacionar ao fato de que este assunto só vem sendo explorado mais recentemente, por ser novo.

#### 4 AS EXTINÇÕES EM MASSA DO FANEROZOICO

O que caracteriza as extinções como de massa é arbitrário e variável, de autor para autor. De acordo com Wake & Vredenburg (2008), em todos os eventos houve grandes perdas na biodiversidade, durante períodos relativamente curtos de tempo.

Barnosky *et al.* (2011) utilizam conceituação similar, defendida também por mais paleontólogos; segundo eles, uma extinção em massa se caracteriza pela perda de 75% das espécies (três quartos) ou mais, em intervalos de tempo geológico relativamente curtos (tipicamente dois milhões de anos). Isso é percebido, principalmente, ao se observar as taxas de extinção, que nestes casos são superiores as de origem de novas espécies. Os mesmos autores levam ainda em consideração a diferença entre taxa de extinção, ou seja, de perda de espécies por unidade de tempo – esta auxilia, segundo Schultz (2010), a classificar a extinção como de fundo ou de massa – e magnitude (número de espécies perdidas), e observam que nestes casos a seletividade de eliminação de espécies diminui ou mesmo desaparece – o que não ocorre em extinções de fundo (mais “discretas”, que eliminam grupos específicos, em intervalos maiores de tempo).

Barnosky *et al.* (2011) finalizam apontando que as hipóteses mais comumente estudadas para as extinções em massa se baseiam nos estudos das sinergias entre certos fenômenos, dentre eles dinâmicas climáticas pouco usuais, composição atmosférica e intensidade anormal de estresses ecológicos, que afetam negativamente muitas linhagens diferentes, acrescentando ainda, ocasionalmente, a ocorrência de certos “acidentes” – como as quedas de bólidos, tal qual aquela ocorrida no final do Cretáceo. Um fator apontado por Twichett (2006) como particularmente relevante é o colapso que estes eventos/fenômenos promovem na produção primária; conseqüentemente haverá falta de abastecimento alimentar (segundo o autor, causa chave de extinção).

As causas que levaram a esta ou aquela extinção são ainda muito estudadas e debatidas, mas parece haver o consenso geral de que as mesmas foram provocadas sempre pela combinação de fatores diversos (e não acontecimentos isolados). Schultz (2010), por exemplo, aponta como causas terrestres principais a tectônica, as mudanças climáticas e as mudanças de salinidade, e como extraterrestres, impactos e radiações cósmicas. Destas

terrestres, Albritton Jr. (1989), além da tectônica e das mudanças climáticas (sendo esta última tratada por ele como mudanças na temperatura global), cita ainda causas relacionadas a mudanças nos níveis dos mares e a história da vida das plantas, como hipóteses alternativas para as extinções em massa.

Das causas extraterrestres, o impacto de bólidos é uma hipótese que ganhou muita força, principalmente, após a publicação de Alvarez *et al.* (1980) sobre os efeitos deste fenômeno na extinção do Cretáceo-Terciário. Dentre as consequências mais apontadas por estes e outros autores está a escuridão (a níveis globais) temporária causada pelo levantamento de pó e detritos (devido ao impacto) na atmosfera, que impediria a fotossíntese (e em seguida levaria à morte) dos produtores primários terrestres ou de superfícies aquáticas. Além disso, nuvens de pó e detritos como estas poderiam ter atuado como refletoras da luz solar, desencadeando processos de glaciação – consequências refutadas por dados provenientes de modelagens mais atuais (TWICHETT, 2006), apesar das evidências encontradas e descritas de maneira pioneira por Alvarez *et al.* (1980), tais quais as altas/anômalas concentrações de Irídio, datadas deste intervalo.

Citam-se cinco grandes extinções em massa – “the big five”, como denominam alguns autores, dentre eles Benton (1995a) – ocorridas no Eon Fanerozoico (FIGURA 1), apresentadas a seguir.

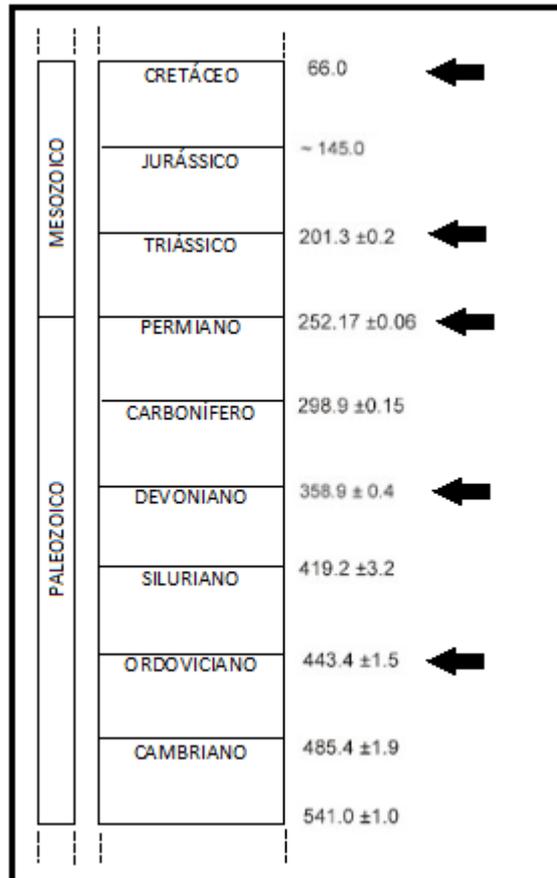


FIGURA 1 – TABELA CRONOESTATIGRÁFICA SIMPLIFICADA COM INDICAÇÃO DOS EVENTOS DE EXTINÇÃO EM MASSA.

As setas indicam os momentos de ocorrência dos eventos de extinção em massa. As datas correspondem a Tabela Cronoestatigráfica Internacional Cohen, Finney & Gibbard (2013). Optou-se por restringir os eventos para os finais dos períodos, devido a variações entre os autores quanto às idades dos mesmos.

#### 4.1 EXTINÇÃO DO FINAL DO ORDOVICIANO

A literatura consultada em geral aponta que a primeira destas extinções em massa ocorreu no final do Ordoviciano. Existem divergências entre os autores, com relação à duração e ao início dos eventos de extinção. Segundo Benton (1995a), este evento ocorreu aproximadamente 439 milhões de anos atrás, ou 443 M.a., de acordo com Barnosky *et al.* (2011), por exemplo. Neste momento, apesar da diversificação e expansão de muitos grupos (tais quais de moluscos – cefalópodes, gastrópodes e bivalves –, corais rugosos e tabulados, briozoários, crinóides e

graptólitos), estes se encontravam mais restritos aos ambientes marinhos (SCHULTZ, 2010).

Benton (1995a) reconstrói o paleoambiente da seguinte maneira: recifes do tipo tropical e as diversificadas faunas associadas viviam ao redor das margens da América do Norte e outras massas terrestres dispostas na linha equatorial, e os mares estavam em transgressão (HALLAM, 1990) enquanto continentes do sul tinham se deslocado para o pólo sul, dando início a uma vasta glaciação. Eram estes, principalmente: Laurentia, Báltica, Sibéria e Gondwana (CRAMER & SALTZMAN, 2005).

Teria sido causada por grandes flutuações no nível do mar, ocasionadas por sucessivas regressões e transgressões marinhas, que geraram vastas glaciações. O gelo se espalhou ao norte em todas as direções, resfriando oceanos ao sul, e retendo água como gelo, o que causou uma baixa global no nível dos mares (BENTON, 1995a), seguidas por um período de grande aquecimento global, o qual gerou a perda de aproximadamente 25% das famílias e de 60% dos gêneros de organismos marinhos (WAKE & VREDENBURG, 2008). Barnosky *et al.* (2011) estimam que esta perda corresponde a 86% das espécies. Segundo Benton (1995a), faunas polares se moveram em direção aos trópicos, e esta fauna marinha associada às águas mais quentes foi eliminada, enquanto este cinturão tropical desaparecia. Barnoski *et al.* (2011) afirmam, ainda, que neste período houve seqüestro de gás carbônico, estando essa atividade relacionada a formação de recifes e plataformas carbonáticas (MUNNECKE, SAMTLEBEN & BICKERT (2003).

## 4.2 EXTINÇÃO DO FINAL DO DEVONIANO

A extinção seguinte ocorreu ao final do Devoniano, e as datas apontadas apresentam algumas divergências, conforme os autores; teria ocorrido entre 364 e 359 milhões de anos atrás, segundo Wake & Vredenburg (2008) e Barnoski *et al.* (2011), respectivamente. Neste momento, os mares estavam em regressão (HALLAM, 1990). Os continentes Laurentia e Báltica se uniram, formando a Euramérica – a qual, posteriormente, ao se unir com o Gondwana (no Carbonífero), formou o Pangeia, no Permiano (TORSVIK *et al.*, 1996).

Segundo McGhee Jr. (1990), as conseqüências deste evento de extinção em massa podem ser relacionadas a “declínios letais na temperatura a níveis globais”, após um período de aquecimento global (ALBRITTON Jr., 1989).

Estima-se a perda de 22% das famílias marinhas e de 57% dos gêneros marinhos, incluindo quase todos os peixes sem mandíbula (75% das espécies extintas, segundo Barnosky *et al.* 2011). Aponta-se que esta, possivelmente, foi causada pelo resfriamento global, após a queda de bólidos (corpos celestes que provocam grande impacto ao adentrar a atmosfera terrestre) – o que é suportado pelo fato de que os táxons de águas mornas/quentes foram os mais afetados (WAKE & VREDENBURG, 2008). Barnosky *et al.* (2011) discutem que este resfriamento foi seguido por um aquecimento global, e este é possivelmente relacionado à diversificação das plantas terrestres, à decomposição (química ou mecânica) de rochas expostas, à formação dos solos (pedogênese) e a redução do gás carbônico global. Citam ainda que existem evidências de anóxia muito difundida em águas profundas as transgressões, e que o *timing* e a importância dos bólidos (fragmentos de corpos celestes que geram impacto ao adentrar a atmosfera terrestre) são, ainda, debatidos.

#### 4.3 EXTINÇÃO DO FINAL DO PERMIANO

A extinção que ocorreu no final do Permiano, segundo Benton (1995a) há aproximadamente 250 milhões de anos, é apontada como a mais drástica de todas. Os mares se encontravam em regressão acentuada (HALLAM, 1990), e as massas terrestres se encontravam unidas, formando o supercontinente Pangeia. Segundo Erwin (1990), isso levou ao aumento de temperaturas e sazonalidade, que caracterizariam um evento de aquecimento global, o qual se manteve até o Triássico.

Segundo Wake & Vredenburg (2008) e Barnosky, *et al.* (2011)., houve a perda de aproximadamente 95% de todas as espécies – não só marinhas como também terrestres – incluindo 53% de famílias marinhas (84% dos gêneros marinhos) e 70% de espécies de plantas terrestres, insetos e vertebrados. As causas apontadas são diversas: vulcanismo Siberiano (que pode ter sido causado a partir do impacto de um bólido – causa ainda debatida), que teria causado um aquecimento global e a difusão de águas marinhas anóxicas, e elevadas

concentrações de ácido sulfúrico e carbônico em regiões marinhas (o que causou uma acidificação oceânica) e terrestres (atmosfera hipóxica) (BARNOSKY, 2011). Kozur (1998) cita ainda que este vulcanismo, na plataforma Siberiana e na parte oriental do mar de Tétis, causou um inverno vulcânico posterior, que pode ter durado de três a seis meses.

#### 4.4 EXTINÇÃO DO FINAL DO TRIÁSSICO

A extinção no final do Triássico ocorreu aproximadamente 202 milhões de anos atrás, de acordo com Benton (1995a). Os mares ainda se encontravam em regressão, mas já haviam subido em relação ao evento de extinção anterior (HALLAM, 1990). O clima ainda era de aquecimento global (ALBRITTON Jr., 1989). Neste intervalo se iniciou a quebra do Pangeia, primeiro em Laurásia, mais ao norte, e Gondwana, ao sul, e o Paleotétis começou a ser consumido, ao passo que o Neotétis (“Neotethys” no trabalho original) se formava (GOLONKA & FORD, 2000).

Este evento teria ocorrido devido ao aumento de temperatura, em função da abertura do oceano Atlântico, provocada pela movimentação das placas tectônicas, e conseqüente derrame de lava e aumento da concentração de gás carbônico. 22% das famílias de organismos marinhos, e 53% dos gêneros do mesmo ambiente foram extintos (WAKE & VREDENBURG, 2008) – o que corresponderia, no total, a uma perda de 80% das espécies (BARNOSKY *et al.* 2011).

#### 4.5 EXTINÇÃO DO FINAL DO CRETÁCEO

A extinção mais recente teria sido a do final do Cretáceo, há aproximadamente 65 milhões de anos, segundo Benton (1995a). Neste intervalo os mares se encontravam em regressão (HALLAM, 1990), o que pode ter relação com o fato do grande número de perdas de organismos marinhos. A América do Sul, a Antártica e a Austrália estavam separadas, assim como a Índia e Madagascar. Os oceanos Índico e Atlântico Sul se formavam (FORSTER, 2003).

Esta tem mais de uma causa apontada, mas as mais citadas são o impacto de um corpo celeste na região do Golfo do México (península de Yucatán), que contribuiu para a ocorrência de mudanças climáticas; estas também ocorreram devido a derrames vulcânicos na Índia (*Deccan traps*), que geraram, por exemplo, o

aumento de temperatura em mares profundos (WAKE & VREDENBURG, 2008). Houve um soerguimento tectônico, que alterou a biogeografia e acelerou processos erosivos, potencialmente contribuindo para eventos de eutrofização e anóxia, e um pico de concentração de gás carbônico pouco antes da extinção, que caiu durante a mesma (BARNOSKY *et al.*, 2011).

Além destes fatores, neste momento também estava ocorrendo uma alteração florística, que acarretou mudanças na composição faunística. Albritton Jr. (1989) discute que, com a diversificação das angiospermas decíduas aproximadamente na metade do período Cretáceo, os solos se tornaram importantes reservas de carbono. Com a regressão dos mares no Cretáceo final, houve a expansão das florestas dominadas por angiospermas, e isto causou mudanças na fauna marinha e terrestre – na primeira, pois a regressão alterou o aporte de nutrientes nesse ambiente, e na segunda devido à diminuição dos habitats dos dinossauros, e os novos locais não poderiam servir como refúgio e nem como fonte de sustento para os mesmos.

Nesse limite houve a perda de 16% das famílias, 47% dos gêneros de organismos marinhos e 18% das famílias de vertebrados – incluindo a dos dinossauros não-avianos (WAKE & VREDENBURG, 2008). De acordo com Barnosky *et al.* (2011), isso corresponde a uma perda (estimada) de 76% das espécies. Segundo Schultz (2010), a extinção teria atingido 85% de todas as espécies.

Alguns autores, como cita Benton (2005), classificam a queda do bólido como o *coup de grâce*, ou seja, o golpe de misericórdia, que acelerou os processos de alteração climática que já estavam em andamento – autores contra esta ideia afirmam que os indícios de perda gradual das espécies seriam, na verdade, artefatos de coleta. Outros afirmam que as evidências que suportam a ocorrência da queda deste bólido (como a anomalia de irídio) poderiam suportar também a ocorrência de grandes erupções vulcânicas – como as já citadas para a Índia (SCHULTZ, 2010).

#### 4.6 QUANTO AOS DEMAIS PICOS DE EXTINÇÃO

Além destas extinções, o Fanerozoico foi marcado por mais eventos de extinção; Benton (1995a) os divide da seguinte maneira: no início e no final do

Cambriano; no final do Ordoviciano, do Devoniano e do Permiano; no início e no final do Triássico; no início e no final do Jurássico; no início e no final do Cretáceo; e no “Terciário”.

Em outra publicação do mesmo ano, Benton (1995b) desmembra o (antigo) Terciário em: um evento entre o Eoceno e o Oligoceno (segundo a tabela geológica mais recente – COHEN, FINNEY & GIBBARD, 2013), que teria dizimado muitas espécies componentes do plâncton e peixes ósseos marinhos, sem evidências de impactos extraterrestres ou mudanças de temperatura; eventos menores no Oligoceno e no Mioceno médio; e um evento ao final do Pleistoceno, bem marcado e conhecido, pela extinção de muitos mamíferos de grande porte (como os mamutes, mastodontes, rinocerontes lanosos e as preguiças gigantes terrestres). Este, no entanto, é ínfimo se comparado ao número total de espécies naquele momento (menos de 1% de perda).

Além destas diferenças, autores como Benton (1995a) e Twitchett (2006) citam ainda outro momento que é, por alguns, considerado como de extinção em massa: o final do Cambriano. O primeiro autor menciona que este seria marcado, por exemplo, por grandes alterações na fauna de trilobitas da América do Norte e outras partes do mundo; o segundo menciona o autor Norman Dennis Newell, que tratou deste assunto no artigo “Paleontological Gaps and Geochronology”, de 1962.

Os eventos como os últimos e os citados nas divisões de Benton (1995a, 1995b) parecem, no entanto, não se adequar aos critérios estabelecidos para classificar uma extinção como “de massa”. Porém, os mesmos também são considerados por diversos autores em modelagens que envolvem a busca por ciclos temporais de extinção periódicos.

## 5 PERIODICIDADE DAS EXTINÇÕES

Albritton Jr. (1989) descreve brevemente as ideias apresentadas quanto à possibilidade de existência de ciclos/períodos de tempo, entre os quais ocorrem eventos de extinção, mais ou menos bem definidos; as causas mais apontadas são terrestres, extraterrestres, ou a conjunção de ambas (como tratado na seção a respeito das extinções em massa).

A seguir se encontram, organizadas segundo a cronologia de publicação, algumas destas ideias, e uma descrição quanto às causas apontadas e os modelos utilizados para os estudos de periodicidade, além de implicações (críticas e defesas feitas) na comunidade científica de alguns destes trabalhos.

### 5.1 CICLOS DE HATFIELD & CAMP (1970) – 80-90 MILHÕES DE ANOS

Hatfield & Camp (1970) foram pioneiros ao tratar da periodicidade dos eventos de extinção, que estaria relacionada a aumentos periódicos nas doses de radiação cósmica, os quais, por sua vez, estariam conectados à posição do Sol na galáxia.

Os autores tratam de extinções que ocorreram, basicamente, em intervalos de 80-90 milhões de anos (possivelmente relacionados à oscilação do Sol, de aproximadamente 58 milhões de anos), e extinções excepcionalmente catastróficas, a cada 225-275 milhões de anos. Neste artigo os autores citam ainda outros, que também correlacionam à posição galáctica do nosso sistema solar e perdas na fauna registrada. Uma das críticas feitas se relaciona justamente a isso: os efeitos mais negativos teriam sido sobre a fauna, e não a flora. No entanto, os autores citam que os resultados da radiação sobre os táxons estudados são muito variados.

Uma das maiores contribuições deste trabalho é atrair atenções para tal hipótese, um tanto quanto negligenciada até aquele momento.

Ao final do artigo os autores discutem que conclusões anteriores, que tratam de aumentos na radiação cósmica seriam demasiado pequenos para produzir danos mutagênicos significativos, podem acabar desconsiderando o relevante efeito do tempo envolvido nestes eventos de extinção e da imensidão do tempo disponível para o acúmulo de alterações genéticas deletérias.

## 5.2 CICLOS DE FISCHER & ARTHUR (1977) – 32 MILHÕES DE ANOS

A ideia apontada como uma das primeiras a tratar da temática de periodicidade das extinções, proposta em 1977 por Fischer e Arthur, descreve ciclos de 32 milhões de anos. A mesma tem a argumentação baseada em variações cíclicas nos oceanos, denominadas como oligotáficas (com poucos táxons) e politáficas (com muitos táxons).

Mares politáficos estariam associados à situação de transgressão marinha, e a momentos em que as taxas de especiação superariam as de extinção. São características destes mares águas mais quentes, e com variação termal (gradiente) menos abruptas. O modo oligotáfico (que corresponderia ao atual) estaria associado a grandes regressões marinhas; no passado, quando na ocorrência destes eventos, são notáveis as extinções de organismos marinhos que nadavam ou flutuavam, além de diminuição biótica a níveis globais, de acordo com Albritton Jr. (1989).

Este modo coincide, segundo este autor, com, no mínimo, sete momentos de crises bióticas, cujas idades (entre parênteses) seguem de acordo com o trabalho original: no Permiano-Triássico (220 Ma), no Triássico-Jurássico (190 Ma), no Jurássico Médio, (158 Ma), no início do Neocomiano (126 Ma), no Cenomaniano (94 Ma), no início do Paleoceno (62 Ma), e no Oligoceno Médio (30 Ma). Com exceção do primeiro intervalo entre os dois limites inicialmente citados (de 30 milhões de anos), os demais correspondem a períodos de 32 milhões de anos.

Fischer e Arthur (1977) não parecem apontar uma causa definida para a periodicidade das extinções, mas claramente as associam a variações nos níveis marinhos. Segundo Albritton Jr. (1989), os autores estão/estavam mais inclinados para causas relacionadas a dinâmicas internas do planeta Terra do que para as que pudessem se utilizar de explicações associadas a processos cósmicos e/ou solares. De acordo com Raup e Sepkoski (1984), estes autores utilizam “uma base de dados limitada, e nenhum teste estatístico foi feito”.

## 5.3 CICLOS DE NAPIER & CLUBE (1979) – 50 MILHÕES DE ANOS

Uma hipótese, menos citada nas revisões de literatura, é a de Napier e Clube, de 1979. Os autores propõem ciclos de 50 milhões de anos, a partir do bombardeamento da Terra por planetesimais.

Estes são corpos sólidos, formados por rocha, gelo e/ou componentes orgânicos (CHON), que crescem à medida que agregam mais matéria. Ao atingirem aproximadamente um quilometro de diâmetro estes planetesimais são capazes de se atraírem, gerando corpos cada vez maiores. Acredita-se que sejam estes os corpos precursores, que formaram planetas gigantes como Júpiter e Saturno (POLLACK *et al.*, 1996).

Segundo Albritton Jr. (1989), durante este tipo de bombardeamento, ondas de choque exterminariam, preferencialmente, animais terrestres maiores, e cadeias alimentares seriam perturbadas e a luz solar bloqueada, devido à poeira levantada para a atmosfera, e ondas gigantes poderiam inundar as porções terrestres. O resfriamento prolongado dos continentes levaria a eventos de glaciação, e haveria efeitos na camada de ozônio, pois esta seria exaurida, e o aporte de radiação ultravioleta teria efeitos agressivos sobre as formas de vida.

#### 5.4 CICLOS DE RAUP & SEPKOSKI (1984) – 26 MILHÕES DE ANOS

Neste artigo de 1984, Raup e Sepkoski trabalham com a existência de ciclos de aproximadamente 26 milhões de anos, a partir de dados de aproximadamente 567 famílias de organismos marinhos (vertebrados, invertebrados e protozoários), em 12 eventos de extinção nos últimos 250 milhões de anos, e pressupondo, ainda, que estes eventos de extinção foram episódicos, e não progressivos. Posteriormente, os autores utilizaram mais famílias, ao testar novamente suas ideias. Quanto às causas, não há uma definitiva apontada, mas, segundo os autores, há motivos para acreditar em razões relacionadas às extraterrestres, por exemplo impacto de meteoritos, pois pelo menos dois dos eventos estão, e seria mais plausível supor uma periodicidade ligada a estas causas – é nisto que se baseou a modelagem científica dos mesmos (utilizaram/realizaram modelos astrofísicos).

Estes 12 eventos foram, em 1986 (a), reduzidos a oito, pelos mesmos autores. São eles, segundo Albritton Jr. (1989) e a escala de tempo geológico até aquele momento: no Permiano final (Guadalupiano), tendo sido a mais severa de todas; no Triássico final (Noriano), sendo uma das cinco grandes extinções em massa; no início do Jurássico (Pliensbachiano), que pode ter sido um evento menor, de duração incerta; no Tithoniano (Jurássico final). 37% dos gêneros marinhos

desapareceram, dentre eles amonitas, bivalves e corais; no Cenomaniano (Cretáceo), com a perda de 28% de gêneros marinhos, segundo o mesmo autor; ao final do Cretáceo (Maastrichtiano) – tendo sido esta a segunda mais severa de todas; no Eoceno final, mais especificamente, Priaboniano (Paleógeno). 16% dos gêneros marinhos desapareceram, por volta de quatro milhões de anos antes do final desta época; o último evento ocorreu no Mioceno médio (Neógeno), entre o Langhiano e o Serravalliano; este seria o mais pobremente documentado de todos.

Os autores chegaram a supor que estes ciclos de 26 milhões de anos seriam, na verdade, parte de ciclos maiores, de 52 milhões de anos, mas ao testar esta hipótese, observaram que a mesma seria uma explicação mais fraca para os dados existentes.

Raup e Sepkoski (1984) concluem o artigo comentando que as implicações da periodicidade para a biologia evolutiva seriam muito grandes, sendo uma delas (“a mais óbvia”, segundo os mesmos) que o sistema evolutivo é parcialmente dependente de influências externas, mais profundas que as mudanças ambientais locais regionais mais comumente consideradas, logo, ele não se encontra sozinho, fechado.

Inúmeras críticas e defesas desta hipótese foram feitas, apesar de muitos autores (inclusive os próprios) terem testado a hipótese inúmeras vezes após a sua publicação em 1984. Estas foram enviadas e publicadas em forma de artigos ou cartas, em revista com altos fatores de impacto, como a Nature, a Science e a PNAS. Quaisquer comentários, de maneira geral, sempre obtiveram réplicas dos autores, em artigos ou cartas subsequentes.

Segundo Sepkoski (1989), as críticas podem ser divididas em quatro grandes categorias: críticas aos dados taxonômicos, aos intervalos amostrais, a escala de tempo e aos métodos estatísticos; algumas delas serão discutidas a seguir.

Benton e King (1989) criticam o primeiro ponto, quanto aos dados taxonômicos. Os autores atentam ao fato de que Raup e Sepkoski (1984) utilizaram dados relativos à famílias e gêneros marinhos, e que, nestes casos, os ciclos de 26 milhões de anos apresentam/podem apresentar relação mais clara com os eventos de extinção em massa. Segundo eles, no entanto, o registro fóssil de tetrápodes não é adequado para testar esta hipótese de ciclicidade em particular, e concluem

dizendo que “os dados de tetrápodes são sugestivos, mas não apresentam de forma conclusiva evidências contra a periodicidade”.

Patterson e Smith (1987) também questionaram (no entanto, de maneira mais amigável) os aspectos taxonômicos utilizados pelos autores, principalmente no que se trata dos dados de peixes e equinodermos (25% dos dados teriam sinal significativo – grupos monofiléticos corretamente datados/registrados – e os outros 75% seriam o chamado “ruído” – grupos datados incorretamente, não monofiléticos, ou com somente uma espécie) – as evidências de periodicidade poderiam se dever a artefatos taxonômicos, e não um fenômeno biológico.

Sepkoski (1987), em resposta, agradece a Patterson e Smith (1987) pelos “erros e imprecisões que eles lhe trouxeram a atenção”, mas rejeita a ideia de artefatos taxonômicos, pela dificuldade na preservação, por exemplo, de peixes e equinodermos. Segundo Sepkoski (1987), “o registro fóssil dos dois grupos pode, de fato, primariamente refletir um “ruído” na fossilização”. Além disto, o autor aponta que pode ter ocorrido um problema com a classificação cladística, que é baseada em geometria filogenética, e qualquer coisa que altere a mesma pode alterar também a classificação, o que levaria, logicamente, a uma falha quanto ao encontro de periodicidade.

Em carta a revista *Nature*, Hoffman (1985) critica o trabalho dos autores de maneira mais ampla: segundo o mesmo, a suposta ciclicidade não pode ser vista como um sinal evolutivo, mas sim como fruto da arbitrariedade na escolha dos níveis taxonômicos, no tratamento destes dados, e na seleção das escalas de tempo geológicas – as extinções em massa seriam, na verdade, resultado de processos estocásticos. Em resposta, Raup e Sepkoski (1986b) realizam testes para verificar se de fato a aleatoriedade se confirmaria, e novamente reafirmam seus resultados, argumentando que Hoffman (1985) teria obtido resultados similares se tivesse realizado os testes estatísticos apropriados.

Gilinsky (1986), semelhantemente, critica Hoffman (1985) e Hoffman e Ghiold (1984), afirmando que tal conclusão dos autores é resultado de uma aplicação incorreta de seu próprio modelo nulo (utilizado para testes de aleatoriedade), o qual, ao ser utilizado corretamente, corroboraria ainda mais os resultados de Raup e Sepkoski (1984). O autor frisa ainda que um modelo nulo (assim como qualquer modelo) é uma simplificação do que de fato ocorre na natureza, sendo assim, mesmo um resultado exato como o que Gilinsky (1986)

obteve, somente uma avaliação aproximada da probabilidade de reproduzir os padrões observados na realidade, e que suas conclusões e as de Raup e Sepkoski suportariam a existência de periodicidade, e demandariam mais estudos para explicá-la.

Situação parecida ocorreu também com Stigler e Wagner (1987): os autores afirmam que, devido à desigualdade no espaçamento de tempo, resultados estatisticamente significativos, que levem a ideia de ciclos de 26 milhões de anos, podem ser obtidos, no entanto estes seriam artefatos – ou seja, resultados obtidos a partir de experimentação errônea. Raup e Sepkoski (1988) argumentam que os autores acabaram reforçando ainda mais suas ideias, pois a hipótese dos mesmos de aleatoriedade pode ser rejeitada com alta significância, mesmo que o efeito da escala de tempo seja visto como um sinal independente, o que, segundo Raup e Sepkoski (1988), não é. Ainda de acordo com os últimos, a ideia dos 26 milhões de anos de fato faz mais sentido em contagens mais grosseiras – ou seja, que considerem menos limites temporais inclusos –, mas, ainda assim, é relativamente clara.

Uma das críticas feitas por Kitchell e Pena (1984) se relaciona a métrica utilizada por Raup & Sepkoski (1984). Segundo eles, o modelo de séries temporais mais adequado é um estocástico auto-regressivo (modelo ARIMA, de ocorrência ao acaso) que demonstra um comportamento pseudo-periódico, como ciclos de 31 milhões de anos, aplicáveis aos últimos 250 milhões de anos – este seria, portanto, mais apropriado que um modelo determinístico. Ao estender para todo o Fanerozoico, a tendência é de que a periodicidade se alongue e se enfraqueça. Os mesmos frisam ainda que a probabilidade de extinção teve decréscimo uniforme com o passar deste éon, enquanto que a inércia ou estabilidade dos sistemas bióticos aumentou depois da chamada crise do Permiano final (segunda parte do Fanerozoico). No entanto, Raup & Sepkoski (1988) julgam a ideia dos ciclos de 31 milhões de anos como aceitável.

Após as muitas críticas e defesas, Raup e Sepkoski (1986b) voltaram a testar seus modelos. Eles resumem os argumentos contrários como: 1) periodicidade seria apenas um “artefato de incertezas” quanto à escala geológica de tempo ou na identificação dos eventos de extinção e 2) a periodicidade seria uma conseqüência natural de muitas causas de extinção ocorrendo/operando de maneira independente. Os mesmos adicionaram mais dados (2160 famílias, contra as 567 do

trabalho inicial) e os testaram ajustando a vários períodos/episódios de extinção. Segundo os autores, mesmo quando a série temporal é reduzida para os quatro eventos melhor datados (no Cenomaniano, Maestrichtiano, Eoceno final e Mioceno médio), a hipótese de aleatoriedade é rechaçada.

Em trabalho de 1988, Raup & Sepkoski resumiram as hipóteses apresentadas até aquele momento, comentam seus pontos positivos/fortes e/ou negativos/fracos, mas citam como algo valioso o aumento no número de pesquisas acerca da temática da periodicidade, visto que esta é uma hipótese com “apoio substancial” – que requer, porém, mais experimentação, que, desejavelmente, deveria contar com maior resolução dos dados biológicos (registro fóssil) e geológicos (ajustes na escala temporal). Além disso, os autores discutem que a escolha entre causas terrestres e/ou extraterrestres para as extinções deveria se manter secundária, pois, se a periodicidade de fato existe, pode se dever a conjunção e/ou interação dos dois tipos. Por fim, os mesmos colocam que os desafios futuros quanto a tal hipótese estão relacionados à separação do que são sinais e ruídos na história terrestre.

#### 5.5 CICLOS DE WITHMIRE & JACKSON (1984) E DAVIS, HUT & MULLER (1984) – APROXIMADAMENTE 28 MILHÕES DE ANOS

Whitmire e Jackson IV (1984) testaram um modelo que levava em consideração as proposições astrofísicas de Raup e Sepkoski (1984), e o período orbital de uma estrela associada/companheira do sol, até então oculta. Sua órbita altamente excêntrica periodicamente causaria perturbações ao passar por uma nuvem de cometas, e então desencadearia uma intensa chuva de cometas, com a duração de poucos milhões de anos (ALBRITTON Jr., 1989). Segundo estes autores os ciclos de 26 milhões de anos não foram detectados nos registros de crateras lunares e terrestres, mas Alvarez e Muller (1984) verificaram que, mesmo considerando erros de medição, a maior parte das crateras ocorre em ciclos de 28,4 milhões de anos, e estes seriam os mesmos encontrados nos registros fósseis das extinções, sendo a probabilidade de tal concordância, por acaso, de uma em 1000.

Nesta linha de raciocínio, Davis, Hut & Muller (1984) denominariam esta estrela associada/companheira do Sol (como citado anteriormente, até então de existência desconhecida) como Nêmesis. O nome, segundo Albritton Jr. (1984), é

relacionado à mitologia grega – essa era a deusa que, de alguma maneira, punia aqueles que tivessem passado por períodos de bonança, como uma “justiça compensatória”. Segundo os autores, esta viajaria em uma órbita moderadamente excêntrica, e, ao estar maximamente próxima do Sol, passaria pela nuvem Oort, que o circunda. Isso perturbaria as órbitas dos cometas lá existentes, o que faria com que vários dos mesmos invadissem o sistema solar nos milhões de anos seguintes a este evento. Os mesmos supõem que esta companheira deva estar em sua máxima distância do Sol, aproximadamente 2,4 milhões de anos-luz, o que não representaria ameaças a vida na Terra pelos próximos 15 milhões de anos.

## 5.6 SUPERCICLOS DE FISCHER (1984) – 300 MILHÕES DE ANOS

Fischer discutiu, em 1984, a existência de superciclos no Fanerozoico, de duração de 300 milhões de anos cada – sendo o primeiro no Paleozoico, e o segundo no Mesozoico-Cenozoico –, alternando períodos de aquecimento e resfriamento global, baseando-se na dependência de ciclos de convecção do manto (ou seja, ciclos relacionados às dinâmicas terrestres), “irregularmente pontuados por eventos catastróficos” e/ou outros ciclos e eventos aleatórios, segundo o mesmo. A combinação de todos estes eventos resultaria, então, em crises bióticas, as quais poderiam levar a eventos periódicos de extinção – as alterações climáticas e geográficas têm efeitos profundos na história da vida.

A convecção seria dividida em duas fases. A fase inicial seria de rápida convecção com numerosas ascensões de magma até a superfície em regiões de quebra de grandes placas litosféricas, além de fratura e dispersão de supercontinentes do tipo Pangeia. Isso geraria um aumento no nível do mar, além de grandes inundações das porções continentais. O vulcanismo intenso nas regiões de quebra e de margens de placas convergentes (basáltico e granítico-andesítico, respectivamente) proporcionaria a liberação máxima de dióxido de carbono proveniente do manto e da crosta, paralela a redução da perda de CO<sub>2</sub> atmosférico para a litosfera, devido à diminuição de superfícies terrestres. O resultado seria um aumento no teor de dióxido de carbono atmosférico até que o aumento da intensidade do intemperismo mais uma vez equilibraria o afluxo proveniente do vulcanismo (FISCHER, 1984).

Esta sequência de eventos levaria ao aquecimento global, caracterizado por baixos gradientes latitudinais, com pólos mais aquecidos e úmidos, e oceanos relativamente mais aquecidos, de convecção, portanto, mais lenta. De acordo com Fischer (1984), tais condições ambientais parecem ter sido as que ocorreram do final do Cambriano ao final do Devoniano, e do início do Jurássico até grande parte (ou a totalidade) do Eoceno (Paleógeno médio).

A segunda fase seria distinta pela diminuição de convecção e pela simplificação dos padrões convectivos; o número de placas litosféricas independentemente ativas seria reduzido, e os continentes sofreriam um acréscimo de materiais – o que se conecta ao fato de que haveria, então, queda do nível do mar. A diminuição da atividade vulcânica resultaria na queda de dióxido de carbono atmosférico, enquanto o crescimento das massas terrestres demandaria mais intemperismo.

A consequência disto é que os reservatórios atmosférico e hidrosférico buscariam um novo equilíbrio em um nível mais baixo – fazendo, portanto, a transição entre o status de aquecimento para resfriamento global. Este seria caracterizado por gradientes latitudinais bem demarcados – sendo as regiões polares frias e secas –, haveria suscetibilidade a formação de camadas de gelo continentais e marinhas – sendo os oceanos mais frios, ativos, e altamente oxigenados. Presume-se que estas foram as condições do final do Proterozoico ao início do Cambriano, na transição do Paleozoico-Mesozoico, e no período que hoje vivemos (denominado anteriormente como segunda parte do Terciário).

Estes estados de aquecimento e resfriamento global teriam durado, cada um, aproximadamente 150 milhões de anos, totalizando assim um ciclo completo de convecções do manto de duração de 300 milhões de anos. As mudanças seriam, de acordo com o trabalho original, de estados de “Icehouse” para “Greenhouse” – o que corresponderia, em trabalhos mais recentes, a resfriamentos e aquecimentos, respectivamente. Segundo o autor, as trocas teriam ocorrido da seguinte maneira (FIGURA 2):

<i>Períodos nos quais ocorreram as trocas</i>	<i>Idade aproximada (em milhões de anos)</i>	<i>Intervalos entre as mudanças (em milhões de anos)</i>	<i>Mudança</i>
Cambriano tardio	500	145	"Icehouse" para "Greenhouse"
Devoniano tardio	355	163	"Greenhouse" para "Icehouse"
Final do Triássico	192	152	"Icehouse" para "Greenhouse"
Eoceno tardio	40		"Greenhouse" para "Icehouse"

FIGURA 2 – TROCAS E INTERVALOS DOS SUPERCICLOS (modificada de Albritton Jr, 1989).

O autor finaliza este trabalho de 1984 citando que o próximo episódio de inversão (de resfriamento para aquecimento, portanto) estaria programado para daqui a mais de 100 milhões de anos. No entanto, vem ocorrendo, comprovadamente, desde o século passado, um aporte artificial de dióxido de carbono na atmosfera, a partir da queima de combustíveis fósseis pelo homem. Tal ação está gerando um episódio atípico, de aquecimento global (o qual o autor esperava que fosse temporário), que vem causando desequilíbrios em sistemas biológicos – os quais podem ser, em alguns casos, irremediáveis. É neste fato, por exemplo, que se baseiam alguns defensores da ideia de que estamos passando pela sexta extinção em massa (WAKE & VREDENBURG, 2008; TWITCHETT, 2006; BENTON, 1995b; BARNOSKI *et al.*, 2011).

## 5.7 CICLOS DE RAMPINO & STOTHERS (1984) – 33 MILHÕES DE ANOS

Ao orbitar a galáxia, o sistema solar oscila verticalmente no plano galáctico, em períodos de aproximadamente 67 milhões de anos – ou seja, a cada, aproximadamente, 33 milhões de anos, o sistema alcança um dos extremos oscilatórios da órbita; segundo Rampino e Stothers (1984) seria esse o “marcapasso básico das extinções em massa” (ALBRITTON Jr., 1989).

Matéria interestelar difusa estaria presente no plano galáctico, e a passagem do sistema pelo mesmo aumentaria as chances de colisão com nuvens interestelares compostas de gases e poeira. Ainda que as mesmas não venham a ocorrer, a grande massa de tais nuvens poderia desencadear perturbações gravitacionais no reservatório interno de cometas do próprio Sistema Solar, o que levaria a chuvas de cometas que poderiam durar até 10 milhões de anos (RAMPINO & STOTHERS, 1984; ALBRITTON Jr., 1989), e causar impactos de corpos de tamanhos maiores. Os autores utilizaram e reanalisaram os dados de Raup e Sepkoski (1984), além de estudos quanto às crateras na Terra, e chegaram a ciclos de 30-31 milhões de anos.

Estudo similar foi feito por Schwartz e James (1984). Estes autores aceitam o ciclo proposto por Rampino e Stothers (1984); segundo eles, um decréscimo na taxa de ionização ocorreria a medida que o Sol se aproximasse dos extremos de oscilação, porque raios cósmicos (confinados pelo campo magnético da galáxia) influenciariam ao balanço de ionização na atmosfera superior. Estas mudanças nos fluxos de raios cósmicos poderiam produzir alterações significantes na biosfera, direta ou indiretamente induzindo a mudanças climáticas cíclicas (ALBRITTON Jr., 1989).

## 5.8 CICLOS DE WHITMIRE & MATESE (1985) – APROXIMADAMENTE 28 MILHÕES DE ANOS

Whitmire e Matese (1985) se basearam na descoberta de que a massa de Plutão seria insuficiente para explicar discrepâncias na movimentação de planetas exteriores para especular a respeito da existência do Planeta X, um décimo planeta (visto que, até aquele momento, Plutão ainda tinha o mesmo status), que poderia causar chuvas de cometas. Estes seriam originais de um cinturão (ou disco) além da órbita de Netuno; ao passar pelas margens internas e externas deste caminho, as

chuvas seriam desencadeadas a cada 28 milhões de anos (metade do período de precessão do planeta). Os cometas se encontrariam concentrados próximos ao plano planetário, e a difusão dos mesmos pelo sistema planetário interno levaria ao aumento de impactos na Terra, de maneira, portanto, periódica (ALBRITTON Jr., 1989).

Esta datação é similar/coincidente com a proposta por Alvarez e Muller (1984) e Whitmire e Jackson IV (1984). Os primeiros, neste mesmo estudo, observaram ciclos de 28,4 milhões de anos, que, aceitando erros de medição, seriam essencialmente iguais aos intervalos de Raup e Sepkoski (1984). Baseando-se na formação de estruturas chamadas “cryptoexplosions” – termo que já caiu em desuso, visto que a formação destas estruturas, antes atribuída a vulcanismo e/ou impacto de corpos extraterrestres, hoje corresponde somente ao segundo evento.

Trefil e Raup (1987) chegaram a resultados similares/ os mesmos continuaram estudando os registros de crateras, e concluíram que as mesmas podem ser geradas periodicamente (aceitariam, então, ciclos de 29 milhões de anos) e/ou de maneira aleatória – majoritariamente desta segunda forma.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alguns autores já questionam se não estaríamos entrando ou vivendo, atualmente, uma nova extinção (WAKE & VREDENBURG, 2008; TWITCHETT, 2006), e apontam que, apesar de constantemente ignorada, ela poderá ser corroborada no futuro (BENTON, 1995b); alguns resultados parecem confirmar que as taxas de extinção atuais se encontram, de fato, muito altas, apontando para a necessidade de medidas de conservação (BARNOSKI *et al.*, 2011).

Wake & Vredenburg (2008) relatam que essa última pode estar sendo causada pelo crescimento da população humana, conversão de habitats, aquecimento global e suas conseqüências, impactos de espécies exóticas, dentre outros motivos, em sua maioria com influência direta ou indireta do homem – algo plausível, e que já foi levado em consideração para a extinção da megafauna ao final do Pleistoceno, com o acréscimo das mudanças ambientais (BARNOSKY *et al.*, 2004), por exemplo, ou ainda de patógenos, com alto potencial letal (SCHULTZ, 2010).

O que se observa atualmente é uma aceleração das alterações climáticas e da composição da atmosfera e intensificação dos estresses ecológicos, devido a ações diretas e indiretas do homem – sem ignorar, no entanto, o fato de que estas modificações já estavam em vias de ocorrência. Ainda segundo Twitchett (2006, p. 190), “compreender os processos de extinção e recuperação em eventos antigos, especialmente os associados ao aquecimento global, pode ser crucial para gerir a crise atual da biodiversidade”.

Apesar da perda dramática de espécies (principalmente numericamente), a partir da remoção ou redução de grupos dominantes (como ocorre comumente em extinções em massa), outros agrupamentos menores, constituintes desta biota (pré-extinção), têm a oportunidade de se diversificar e se expandir, seja numérica ou geograficamente. Estes eventos podem acabar por eliminar características de alto valor seletivo para as espécies, se as mesmas não possuírem traços que lhes confirmam resistência às extinções, mas isso não impede, por exemplo, que tais traços reapareçam no futuro, segundo Jablonski (1989).

Na literatura consultada citam-se principalmente cinco grandes momentos de extinção no Éon Fanerozoico caracterizados como de massa – “the big five”. Estes ocorreram no final do Ordoviciano, no final do Devoniano, no final do Permiano, no

final do Triássico, e no final do Cretáceo, segundo os parâmetros, discutidos na seção que trata destes eventos neste trabalho. Optou-se por restringir os eventos para os finais dos períodos, devido a variações entre os autores quanto às idades dos mesmos.

Além destas, existem outras divergências quanto aos estudos das extinções em massa, até mesmo quanto à “confusão” ao distinguir o que seria de fato uma “extinção em massa” e um “evento de extinção” (RAUP & SEPKOSKI, 1986).

Alguns autores (BENTON, 1995a; TWITCHETT, 2006) definem que, além das “big five”, extinções também ocorreram em outras situações, tal qual as já citadas do Plioceno, do Pleistoceno, ou mesmo a atual. Convencionou-se, a partir dos trabalhos consultados, aceitar uma extinção como de massa quando ocorre a eliminação de no mínimo 75% de todas as espécies existentes em intervalos de tempo relativamente curtos (aproximadamente dois milhões de anos, segundo Barnoski *et al.* (2011).

Ademais, outra divergência constante parece ser quanto às causas (BENTON, 1995a). Alguns cientistas atribuem a cada evento motivos específicos, enquanto outros buscam por uma explicação única, que justifique todos os ocorridos.

Ao se considerar isto, Benton (1995a) discute que esse “motivo único” poderia envolver mudanças esporádicas na temperatura (principalmente quanto a resfriamentos e aquecimentos) ou nos níveis marinhos, impactos periódicos de asteroides (corpos extraterrestres rochosos), ou ainda de cometas (bolas de gelo, segundo o mesmo autor).

Os autores que produziram modelos para definir e explicar a existência de ciclos periódicos de extinção levaram em consideração não somente os cinco grandes eventos já tratados, mas também alguns outros, variáveis de autor para autor, a fim de contar com mais dados para corroborar suas hipóteses.

O trabalho de Napier e Clube (1979), um dos que trata deste tema, consta na base de dados ISI Web Of Knowledge como 95 vezes citado. No entanto, parece ser impossível localizar estatística similar quanto ao trabalho de Fischer e Arthur (1977) na mesma base, pois este não se encontra lá indexado, por exemplo.

A ideia da periodicidade realmente ganhou força com a proposição de 1984, de Raup e Sepkoski, de ciclos temporais relativamente regulares durante o Éon Fanerozoico. O modelo por eles proposto parece ter sido, até hoje, o que causou o

maior impacto na comunidade científica, predominantemente na Paleontologia, com 465 citações segundo a base de dados ISI Web Of Knowledge.

Dentre os que os citaram, existem os que os apoiaram, que os rejeitaram – e que, muitas vezes, tentaram demonstrar que estavam equivocados –, e os que citaram Raup & Sepkoski (1984) como pioneiros nesta proposição.

Muitas críticas foram feitas, relacionadas aos dados taxonômicos, aos intervalos amostrais, a escala de tempo e aos métodos estatísticos (BENTON & KING, 1989; PATTERSON & SMITH, 1987; HOFFMAN, 1985; HOFFMAN & GHIOLD, 1984; STIGLER & WAGNER, 1987; KITCHELL & PENA, 1984); da mesma forma, muitas defesas foram feitas, não somente pelos próprios autores (GILINSKI, 1986; WHITMIRE & JACKSON IV, 1984).

Apesar de não terem sido eles os primeiros a sugerir tal tipo de hipótese, este trabalho chama a atenção por ter gerado muitos comentários, positivos e negativos, impulsionando a pesquisa acerca deste tema. O artigo é citado até hoje, com aproximadamente 16 citações por ano, desde a sua publicação (segundo dados estatísticos da ISI Web Of Knowledge); o pico de citações foi em 1986 (42), e este número decresceu a partir de 1990, se aproximando da média já citada – o que nos dá uma noção de sua importância científica.

Independentemente da validade e precisão destes resultados, a contribuição deste e dos demais modelos que buscaram e buscaram periodicidade é muito grande, não somente por atraírem atenção para um tema tão relevante, mas também, dentre outros motivos, por demonstrarem aplicabilidade não só na Paleontologia, mas também nas áreas da Zoologia, Botânica, Ecologia e Biologia da Conservação, por exemplo.

É possível que existam mais trabalhos que tratem da periodicidade das extinções em massa, porém – ao menos até este momento – não indexados na base de dados utilizada. Além disto, o número de publicações possivelmente ainda é relativamente baixo, pois esta proposição parece ser relativamente nova, se comparada ao conhecimento já obtido a respeito das demais extinções em massa. De qualquer forma, isto pode ser, inclusive, evidência da necessidade de mais pesquisas e esclarecimentos de um tema tão potencialmente esclarecedor, não só para a compreensão de eventos passados, mas também futuros.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, L. W. *et al.* **Extraterrestrial Cause for the Cretaceous–Tertiary Extinction.** *Science*, vol. 208, p. 1095– 1108, 1980.
- ALVAREZ, W. & MULLER, R. A.. **Evidence from crater ages for periodic impacts on the Earth.** *Nature*, vol. 308, p. 718-720, 1984.
- ALBRITTON JR, C. C.. Mass extinctions. In: **Catastrophic episodes in Earth history.** Londres: Chapman and Hall, 1989. p. 94-107.
- BARNOSKI, A. D. *et al.* **Assessing the Causes of Late Pleistocene Extinctions on the Continents.** *Science*, vol. 306, p. 70-75, 2004.
- BARNOSKI, A. D. *et al.* **Has the Earth’s sixth mass extinction already arrived ?** *Nature*, vol. 471, p. 51-57, 2011.
- BENTON, M. J.. Mass Extinction, Biotic and Abiotic. In: **Encyclopedia of Environmental Biology.** Vol. 2. Londres: Academic Press, Inc., 1995 (a). p. 523-534.
- BENTON, M. J.. **Diversification and Extinction in the History of Life.** *Science*, vol. 268, p. 52-58, 1995 (b).
- BENTON, M. J.. The Age of Dinosaurs. In: **Vertebrate Paleontology.** 3. ed.. Reino Unido: Blackwell Publishing, 2005. p. 187-255.
- BENTON, M. J.. & KING, P. W.. **Mass Extinctions Among Tetrapods and the Quality of the Fossil Record [and Discussion].** *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences.*, vol. 325, n. 1228, p.369-386, 1989.
- COHEN, K. M., FINNEY, S. & GIBBARD, P. L.. **International Chronostratigraphic Chart.** Disponível em: < <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2013-01.pdf> > Acesso em: 30 jun. 2013.
- CRAMER, B. D. & SALTZMAN, M. R.. **Sequestration of <sup>12</sup>C in the deep ocean during the early Wenlock (Silurian) positive carbon isotope excursion.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 219, p. 333– 349, 2005.
- DAVIS, M., HUT, P. & MULLER, R. A.. **Extinction of species by periodic comet showers.** *Nature*, vol. 308, p. 715 – 717, 1984.
- ERWIN, D. H.. End-Permian. **Palaeobiology–A Synthesis.** Reino Unido: Blackwell Science Ltd., 1990. p. 187-194.
- FISCHER, A. G.. The two Phanerozoic supercycles. In: **Catastrophes and Earth History.** Princeton: Princeton University Press, 1984. p. 129-150.

FISCHER, A. G. & ARTHUR, M. A.. Secular variations in the pelagic realm. In: **Deep-Water Carbonate Environments**. Tulsa: Society of Economic Paleontologists & Mineralogists, 1977. p. 19-50.

FORSTER, C. A.. Drifting continents and life on Earth. In: **Evolution on Planet Earth**. Londres: Academic Press, 2003. p. 279-294.

GILINSKY, N. L.. **Was there a 26-Myr periodicity of extinctions?** *Nature*, vol. 321, p. 533-534, 1986.

GOLONKA, J. & FORD, D.. **Pangean (Late Carboniferous–Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 161, p. 1–34, 2000.

HALLAM, A.. Earth-bound Causes. In: **Palaeobiology–A Synthesis**. Reino Unido: Blackwell Science Ltd., 1990. p. 160-164.

HATFIELD, C. B. & CAMP, M. J.. **Mass Extinctions Correlated with Periodic Galactic Events.** *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, p. 911-914, 1970.

HOFFMAN, A.. **Patterns of family extinction depend on definition and geological timescale.** *Nature*, vol. 315, p. 659-662, 1985.

HOFFMAN, A. & GHIOLD, J.. **Randomness in the pattern of ‘mass extinctions’ and ‘waves of origination’.** *Geological Magazine*, vol. 122, p. 1-4, 1984.

**ISI Web of Knowledge.** Disponível em: <<http://isiwebofknowledge.com/translations/portugues-portugal/>> Acesso em: 11 jun. 2013.

JABLONSKI, D.. **Keeping time with mass extinctions.** *Paleobiology*, vol. 10, n. 2, p. 139-145, 1984.

JABLONSKI, D.. **The Biology of Mass Extinction: A Palaeontological View.** *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 325, n. 1228, p. 357-368, 1989.

KITCHELL, J. A. & PENA, D.. **Periodicity of Extinctions in the Geologic Past? Deterministic Versus Stochastic Explanations.** *Science*, vol. 226, p. 689-691, 1984.

KOZUR, H. W.. **Some aspects of the Permian-Triassic boundary (PTB) and of the possible causes for the biotic crisis around this boundary.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 143, p. 227-272, 1998.

McGHEE Jr., G. R.. Frasnian-Framennian. In: **Palaeobiology–A Synthesis**. Reino Unido: Blackwell Science Ltd., 1990. p. 184-187.

MUNNECKE, A. SAMTLEBEN, C. & BICKERT, T.. **The Ireviken Event in the lower Silurian of Gotland, Sweden—relation to similar Palaeozoic and Proterozoic events.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 195, p. 99-124, 2003.

NAPIER, W. M. & CLUBE, V. M.. **A theory of terrestrial catastrophism.** *Nature*, vol. 282, p. 455-459, 1979.

PATTERSON, C. & SMITH, A. B.. **Is the periodicity of extinctions a taxonomic artefact?** *Nature*, vol. 330, p. 248-251, 1987.

POLLACK, J. B. *et al.* **Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas.** *Icarus*, vol. 124, p. 62-85, 1996.

RAMPINO, M. R. & STOTHERS, R. B.. **Terrestrial mass extinctions, cometary impacts and the Sun's motion perpendicular to the galactic plane.** *Nature*, vol. 308, p. 709-712, 1984

RAUP, D. M.. **Periodicity of Extinction: a Review.** In: **Controversies in modern geology: evolution of geological theories in sedimentology, Earth history and tectonics.** Londres: Academic Press, 1991. p. 193-208.

RAUP, D. M. & SEPKOSKI, J. Jr.. **Periodicity of extinctions in the geologic past.** *PNAS.*, vol. 81, p. 801-805, 1984.

RAUP, D. M. & SEPKOSKI, J. J. Jr.. **Periodic Extinction of Families and Genera.** *Science*, vol. 231, p. 833-836, 1986 (a).

RAUP, D. M. & SEPKOSKI, J. J. Jr.. **Was there a 26-Myr periodicity of extinctions?** *Nature*, vol. 321, p. 533, 1986 (b).

RAUP, D. M. & SEPKOSKI, J. J. Jr.. **Testing for Periodicity of Extinction.** *Science*, vol. 241, p. 94-96, 1988.

RHODE, R. A. & MULLER, R. A.. **Cycles in fossil diversity.** *Nature*, vol. 434, p. 208-210, 2005.

SCHULTZ, C. L.. **Extinções.** In: **Paleontologia – Conceitos e Métodos.** 3 ed., vol. 1. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. p. 163-180.

SCHWARTZ, R. D. & JAMES, P. B.. **Periodic mass extinctions and the Sun's oscillation about the galactic plane.** *Nature*, vol. 308, p. 712-713, 1984.

SEPKOSKI, J. J. Jr.. **Is the periodicity of extinctions a taxonomic artefact?** *Nature*, vol. 330, p. 251-252, 1987.

SEPKOSKI, J. J.. **Periodicity in extinction and the problem of catastrophism in the history of life.** *Journal of the Geological Society*, vol. 146, p. 07-19, 1989.

STIGLER, S. M. & WAGNER, M. J.. **A Substantial Bias in Nonparametric Tests for Periodicity in Geophysical Data.** *Science*, vol. 238, p. 940-945, 1987.

TORSVIK, T. H. *et al.* **Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic –A tale of Baltica and Laurentia.** *Earth-Science Reviews*, vol. 40, p. 229-258, 1996.

TREFIL, J. S. & RAUP, D. M.. **Numerical simulations and the problem of periodicity in the cratering record.** *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 82, p. 159-164, 1987.

TWITCHETT, R. J.. **The palaeoclimatology, palaeoecology and palaeoenvironmental analysis of mass extinction events.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 232, p. 190-213, 2006.

WAKE, D. B. & VREDENBURG, V. T.. **Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians.** *PNAS*, vol. 105, p. 11466–11473, 2008.

WITHMIRE, D. P. & JACSKON IV, A. A.. **Are periodic mass extinctions driven by a distant solar companion?** *Nature*, vol. 308, p. 713-715, 1984.

WHITMIRE, D. P. & MATESE, J. J.. **Periodic comet showers and planet X.** *Nature*, vol. 313, p. 36 – 38, 1985.