UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas

Departamento de Geografia

Programa de Pós-Graduação em Geografia Física

NEWTON MONTEIRO DE CAMPOS JÚNIOR

**ELEMENTOS PARA UM DEBATE SOBRE O CLIMA NO
ÉON FANEROZOICO**

São Paulo

2017

NEWTON MONTEIRO DE CAMPOS JÚNIOR

**ELEMENTOS PARA UM DEBATE SOBRE O CLIMA NO
ÉON FANEROZOICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo para a obtenção do grau de Mestre em Geografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Luís Antonio Bittar Venturi.

São Paulo

2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

C198e Campos Jr, Newton Monteiro de
Elementos para um debate sobre o clima no Éon
Fanerozoico / Newton Monteiro de Campos Jr ;
orientador Luís Antônio Bittar Venturi. - São Paulo,
2017.

128 f.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia,
Letras e Ciências Humanas da Universidade de São
Paulo. Departamento de Geografia. Área de
concentração: Geografia Física.

1. Variabilidade Climática. 2. Dinâmica
Geomorfológica. 3. Paleoclimatologia. 4.
Paleogeografia. 5. Fanerozoico. I. Venturi, Luís
Antônio Bittar, orient. II. Título.

CAMPOS JR., NEWTON M. Elementos para um debate sobre o clima no Éon Fanerozoico.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo para a obtenção do grau de Mestre em Geografia Física.

Aprovado em: ____/____/____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

*Dedico este trabalho aos que me antecederam na transformação
do saber particular em conhecimento público.*

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Jurandyr Luciano Sanches Ross, pelo apoio e confiança.

Agradeço à Prof^a. Dr^a. Maria Elizabeth Zucolotto, pela colaboração.

Agradeço ao Prof. Dr. Ricardo Augusto Felício, pelo incentivo.

Agradeço ao Prof. Dr. Tarik Rezende de Azevedo, pelas sugestões.

Agradeço aos colegas que leram e opinaram para melhorar a legibilidade deste trabalho:

Hector Rafael dos Santos, Alexandre Goretkin Neto e Danilo Rogerio de Sousa.

RESUMO

CAMPOS JR., Newton M. Elementos para um debate sobre o clima no Éon Fanerozoico. 129PG. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

O objetivo deste trabalho de pesquisa é o de buscar entender os tempos e eventos que determinaram as grandes mudanças climáticas no Éon Fanerozoico. Técnicas são constituídas, metodologias estabelecidas, e por vezes são aceitas como sendo as verdades científicas. Com as inovações nas técnicas, com o mudar das ciências, mudam as evidências, mudam as verdades, fazendo mudar nossa percepção do passado. Este trabalho apresenta elementos para um debate sobre o clima da Terra no Fanerozoico, estabelecido a partir de pesquisas bibliográficas sobre evidências passadas e atuais.

Palavras-chave: variabilidade climática, dinâmica geomorfológica, paleoclima, paleogeografia, fanerozoico.

ABSTRACT

CAMPOS JR., Newton. M. **Elementos para um debate sobre o clima no Éon Fanerozoico.** 129PG. Dissertation (Master degree) - Faculty of Philosophy, Letters and Human Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2017.

The goal of this research work is to understand the times and events that determined the great climatic changes in the Phanerozoic Eon. Techniques are constituted, methodologies are established, and are sometimes accepted as scientific truths. With innovations in techniques, with the change of science, change the evidence; change the truths, making change our perception of the past. This paper presents elements for a discussion on the Earth's climate in Phanerozoic established from bibliographical research on past and current evidences.

Keywords: Climate variability, geomorphological dynamics, paleoclimate, paleogeography, phanerozoic.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

^{14}C - Carbono-14 ou radiocarbono, isótopo radioativo com 6 prótons e 8 nêutrons.

^{14}N - 99,6% do Nitrogênio natural, isótopo estável com 7 prótons e 7 nêutrons.

^{16}O - Oxigênio-16, isótopo natural estável de oxigênio, com 8 prótons e 8 nêutrons.

^{18}O - Oxigênio-18, isótopo natural estável de oxigênio, com 8 prótons e 10 nêutrons.

^{86}Sr - Estrôncio-86, isótopo natural do estrôncio.

^{87}Sr - Estrôncio radiogênico gerado pelo decaimento do rubídio ^{87}Rb .

$^{\circ}\text{F}$ - grau na escala de temperatura Fahrenheit.

α (alfa) - partícula emitida de núcleos atômicos, com 2 prótons e 2 nêutrons.

β (beta) - partícula emitida de núcleos atômicos, como elétron ou pósitron.

$*^{18}\text{O}$ - (delta 18 O) - razão isotópica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, usada em paleotermometria.

Ga - Giga anos, ou 1 bilhão de anos.

FBC - Faroe Bank channel (canal no banco das ilhas Faroe).

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change.

Ma - Mega anos, ou 1 milhão de anos.

MIS – Marine Isotope Stage.

Mol, moles - unidade do Sistema Internacional para a grandeza quantidade de substância.

NOAA - National Oceanographic and Atmospheric Administration.

OAE – Ocean Anoxic Event (evento anóxico oceânico).

p. - página ou páginas.

pCO_2 - pressão parcial do dióxido de carbono atmosférico.

pH - potencial de hidrogênio, que indica a acidez ou basicidade de uma solução.

ppmv - partes por milhão por volume (uso na relação entre quantidades molares de gases).

sic - segundo informações colhidas, por errado ou estranho que possa parecer.

Sv - Sverdrups ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$), unidade de medida de transporte de massa oceânica.

UV - ultra violeta, radiação eletromagnética imediatamente inferior à da luz visível.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama da circulação atmosférica.....	14
Figura 2 - As camadas do interior da Terra, com a descontinuidade de Mohorovicic.....	17
Figura 3 - Distribuição de fósseis do Pangea	21
Figura 4 - A simetria de um pão.....	22
Figura 5 - As crostas da Terra e de Vênus.....	23
Figura 6 - Esquema da descontinuidade de Mohorovicic.....	26
Figura 7 - Esquema de tipos de vegetação de um perfil topográfico	30
Figura 8 - Mapa físico do hemisfério sul terrestre.....	31
Figura 9 - Imagem de satélite da Índia e sudeste asiático	34
Figura 10 - Reservatórios e fluxos do ciclo do oxigênio atmosférico	35
Figura 11 - Esquema do balanço energético anual estimado para a superfície da Terra.....	39
Figura 12 - Células de circulação primária e cinturões de vento prevalecentes na Terra	40
Figura 13 - Correntes superficiais oceânicas.....	42
Figura 14 - As forças que afetam as zonas de ressurgência costal	43
Figura 15 - Condensação de água em torno de partículas ou aerossóis	44
Figura 16 - Estromatólitos antigos e modernos.....	49
Figura 17 - Distribuição dos acritarcos nos ambientes plataformais.....	50
Figura 18 - Reconstrução proposta de Rodínia para 750 Ma.	52
Figura 19 - Fauna Ediacarana, <i>Spriggina floundersi</i> , anelídeo primitivo	53
Figura 20 - Estágios iniciais no ciclo de vida de plantas do sistema de raízes stigmária.....	64
Figura 21 - Vista aérea de salina na planície inundável mato-grossense	67
Figura 22 - O <i>Lystrosaurus georgi</i> , Rússia Central europeia; Triássico Inferior	69
Figura 23 - A menor flutuação ambiental da região intertropical.	72
Figura 24 - Uma possível evolução da disposição dos continentes no Fanerozoico.....	75
Figura 25 - O nível do mar na América do Norte, no Cretáceo.	78
Figura 26 - Mapa do GSR (Greenland-Scotland Ridge)	79
Figura 27 - Mapa da Passagem de Drake, no Mar de Escócia, Antártida.	80
Figura 28 - Transferência de energia mecânica entre Terra e Lua.	81
Figura 29 - Calor planetário lubrificando geleiras.....	84
Figura 30 - Precessão dos Equinócios.	85
Figura 31 - Estágios de controle glacial de recifes em quatro estágios.....	88
Figura 32 - Ciclos de Milankovitch: excentricidade, obliquidade e precessão	89
Figura 33 - Mapa do constituinte semidiurno das marés e dos pontos anfidrômicos.....	104
Figura 34 - Choque do cometa Shoemaker-Levy-9 com Júpiter, após implodir em órbita.	106
Figura 35 - Sequência de desenhos representativos do Limite de Roche.....	107
Figura 36 - Imagem de colapso de crosta planetária.	109
Figura 37 - Mapa da idade geológica das crostas continentais	111
Figura 38 - Fóssil vegetal coletado na superfície lunar.	112
Figura 39 - Tsunami no Japão em 2011.	115
Figura 40 - Exemplo de uma cratera de impacto.....	116
Figura 41 - Superfícies se deformam ante forças gravitacionais.....	117
Figura 42 - Tsunami no Japão, março de 2011.....	118
Figura 43 - Mapa dos limites difusos das placas tectônicas	119

Figura 44 - Mapa da Elevação do Rio Grande	120
Figura 45 - A faixa pré-carbonífera a oeste dos Andes	122
Figura 46 - Espessura da crosta, baseado em gravidade inversa e <i>hotspots</i> de Reunião.....	124
Figura 47 - Anole azul (<i>Anolis gorgonae</i>) macho em Górgona, Colômbia.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Éon Fanerozoico.....	19
Tabela 2 - Proporcionalidade das formas de carbono superficial terrestre.....	36
Tabela 3 - Fracionamento de isótopos de enxofre.....	37
Tabela 4 - As divisões do tempo geológico.....	47
Tabela 5 - As divisões do tempo Fanerozoico.....	55
Tabela 6 - Comparativo de massas de carbono nos ciclos de curto e longo prazos	61
Tabela 7 - Comparativo entre as séries de intemperismo e de cristalização magmática.....	62
Tabela 8 - Abundância de carvão recuperável em função da idade geológica.....	65
Tabela 9 - Comparativo de altura média dos continentes.....	68
Tabela 10 - Eventos de anoxia oceânica no Jurássico e Cretáceo	70
Tabela 11 - Uma possível paleogeografia do Fanerozoico.....	75
Tabela 12 – Volume de água nos oceanos.....	79
Tabela 13 - Massa e volume considerados em cálculo do Limite de Roche	108
Tabela 14 - Perda de massa terrestre, em função da perda de energia	128

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - A regra de Oddo-Harkins (1914)	33
Gráfico 2 - A explosão da vida no cambriano	54
Gráfico 3 - Estimativa da composição isotópica da água do mar do Fanerozoico	58
Gráfico 4 - Gráfico de variação do $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oceânico através do Fanerozoico.	59
Gráfico 5 - Gráfico do RCO ₂ e % O ₂ atmosférico no éon Fanerozoico.....	61
Gráfico 6 - Nível dos oceanos e temperaturas globais no Fanerozoico.....	77
Gráfico 7 - Reconstrução do clima dos últimos 5 Ma, pela razão isotópica do oxigênio	87

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	13
1.1 – Generalidades.	13
1.2 – Estrutura da Dissertação.	18
1.3 – Objetivo e Hipóteses.....	19
1.4 – Contextualização.	20
2 – REFERENCIAL TEÓRICO E METODOLÓGICO.	25
2.1 – Embasamento Teórico.	25
2.2 – Metodologia da Crença de Charles Peirce.....	27
2.3 – Métodos em Paleoclimatologia.	28
2.4 – Geoquímica no Longo Prazo.	32
3 – SISTEMAS CLIMÁTICOS.	39
3.1 – O Sistema Climático da Terra Hoje.....	39
3.2 – Clima no Pré-Cambriano.	47
3.3 – Clima no Fanerozoico.....	55
3.4 – Continentes e Oceanos.....	74
3.5 – Mudanças Climáticas Orbitais.....	81
4 – RESULTADOS.	90
5 – CONCLUSÕES.....	92
6 – REFERÊNCIAS.	93
APÊNDICE A – As Marés.	103
APÊNDICE B - O limite de Roche.	106
APÊNDICE C – O regolito da Lua.	110
APÊNDICE D – Variações da distância lunar.	116
APÊNDICE E – Alternativas à Teoria da Tectônica de Placas.....	119
APÊNDICE F – Conexões no Permiano.	125
APÊNDICE G – Perda de energia pela Terra.....	127

1 – INTRODUÇÃO

Penser l'espace pour savoir s'y organiser, pour savoir y combattre.
Yves Lacoste

1.1 – Generalidades.

O conhecimento científico é erroneamente visto por muitos como algo pronto e inquestionável, resultante da inspiração e genialidade de um cientista iluminado. Esta visão “mítica” vai sendo substituída por uma conscientização de que o conhecimento científico resulta de um trabalho conjunto e que as teorias vigentes vão sendo modificadas ou substituídas, à medida que novos equipamentos, técnicas e metodologias são desenvolvidos ou novos dados são incorporados (CELINO & LEITE, 2001).

“O historiador ‘escreve’ a História, mas também deve ‘teorizar’ sobre ela, ou seja, refletir e descobrir fundamentos gerais a respeito da natureza do histórico e, além disso, sobre o alcance explicativo de seu próprio conhecimento.” (ARÓSTEGUI, 2006¹, p.24).

Consideramos que clima, coloquialmente, é a sensação térmica num determinado ambiente. Implica no grau de conforto humano. Apesar de a superfície terrestre representar apenas 0,1% da Terra, "essa é a camada mais de perto relacionada com a vida humana" (OZIMA, 1991, p.69). Existem três componentes principais do clima na superfície terrestre: o Sol, a atmosfera e os oceanos.

O problema a ser investigado é sobremaneira um problema geográfico: climatológico, biogeográfico e geomorfológico. Este estudo, objeto de pesquisa, trata da evolução da biosfera; do ambiente onde vive e pensa o *Homo sapiens sapiens*. Esta biosfera possui íntimo relacionamento com a circulação atmosférica. As ligações entre os continentes, o nível dos oceanos, assim como o relevo, condicionam o clima e a evolução da vida no planeta. A disposição dos continentes é determinadora da fisiografia dos oceanos e das correntes marítimas. O posicionamento de nosso planeta no Sistema Solar determina as temperaturas dominantes; o nível dos oceanos em relação aos continentes; determina as forças de maré que nos afetam.

¹ A obra de Aróstegui não se propõe a reavivar o positivismo, apesar de conter uma proposta racionalista. Pressupõe que o historiador se coloque mais próximo do cientista do que do artista. A história não é questão de opinião ou gosto, mas que é feita por sujeitos corpóreos, e que são estes os que constituem e modificam classes, estruturas e sistemas. O sujeito só se apreende na razão, tanto instrumental como histórica.

As forças de maré (ver Apêndice A – As Marés.) – mensuráveis, rítmicas – atuam desde que a Terra formou-se no Sistema Solar. Elas atuam sobre os oceanos, sobre a atmosfera e sobre a crosta em geral. Contrapondo-se à gravidade, essas forças estressam a crosta, principalmente na faixa intertropical. A persistência destas forças – principalmente devido à interação gravitacional com a Lua e com o Sol – colaboram para nossa forma geoidal (ver Figura 1).

Figura 1 - Diagrama da circulação atmosférica²

As camadas atmosféricas elevam-se mais nas zonas intertropicais do que nas regiões polares.

Se o mar se eleva alguns metros em relação à costa, pensemos sobre o quanto se expande e se contrai a atmosfera, semidiurnamente, pela atuação dessas forças rítmicas.

² Fonte: http://staff.orecity.k12.or.us/steve.tebor/atm%20currents/current/html/sst_currents.html.

Considerando a diferença de densidades entre ar e água³, seria algo entre 100 e 1000 vezes o desnível marinho, como um fole atmosférico. Provocaria os ventos alísios⁴?

Em seus estudos sobre o clima urbano de São Paulo, Tarifa (2001) apresenta a hipótese de que o(s) clima(s) é(são) uma composição da totalidade dos ritmos dos estados da atmosfera sobre um lugar na superfície da Terra para uma determinada relação espaço-tempo. No espaço global, ao longo de centenas de milhões de anos, o ritmo deve incluir mudanças significativas.

O estudo das mudanças climáticas no Éon Fanerozoico, em virtude de sua extensão temporal, exige uma visão geológica e astronômica: uma geografia ampliada. Quando combinadas com simulações, as reconstruções paleoclimáticas podem ser usadas para testar hipóteses sobre mudanças climáticas, tais como as variações na concentração de gases atmosféricos, a variabilidade solar, as variações orbitais da terra, e os processos hidrológicos, oceanográficos e tectônicos.

O médico, filósofo e fazendeiro James Hutton (1726-1797), considerado o pai da Geologia, refletiu que a Terra ainda age mais ou menos como sempre agiu: “*O presente é a chave para o passado*”. Os processos, como os de formação das rochas, ainda seriam os mesmos (criação, erosão, depósito, modificação, erosão) e esses procedimentos ocorreriam em períodos de tempo inconcebivelmente longos, à sua época. (HUTTON, 1788, apud WINCHESTER⁵, 2004, cap.5). As conclusões de Hutton foram apoiadas por exames aos estratos de suas fazendas.

O matemático, filósofo e engenheiro de minas alemão Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) evocou que a Terra teria sofrido transformações bruscas que inexistem atualmente, as quais teriam afetado a forma dos animais que vinham sendo produzidas ao longo das linhagens: *As objeções contrapostas pelos sábios pouco importam. ... Isso advém de julgarem em demasia o estado primitivo do globo por seu estado atual.* (LEIBNIZ, 1749, apud 1997, cap. 26). Parece que Leibniz se mostrava um precursor do *Equilíbrio Pontuado* – teoria evolutiva recente que propõe que a maior parte das populações de organismos de

³ Densidade do ar seco = $1,2754 \times 10^{-3}$ g/cm³; densidade da água = 1 g/cm³.

⁴ Trade winds.

⁵ Em 1793, William Smith, construtor de canais, percebeu que as rochas que escavava estavam arrumadas em camadas; ele pode ver claramente que os fósseis encontrados em uma camada eram bem diferentes dos da camada subsequente. Seguindo os fósseis, poder-se-ia traçar camadas de rochas à medida que elas mergulhavam e emergiam da terra. Um fenômeno óbvio nos terrenos da Inglaterra, que também se repetiria em todo o planeta.

reprodução sexuada experimentam pouca mudança ao longo do tempo geológico e, quando mudanças evolutivas abruptas no fenótipo ocorrem, elas se dão de forma rara e localizada em eventos rápidos de especiação, provenientes de reinícios após eventos catastróficos.

O nível de gradualismo considerado por Charles Darwin em sua teoria da evolução é praticamente inexistente no registro fóssil: a estabilidade domina a história da maioria das espécies fósseis. A teoria do *Equilíbrio Pontuado* sugere que, periodicamente, aconteceriam eventos que isolariam geograficamente ou mesmo extinguiriam algumas espécies. Surgiriam, pois, oportunidades para o desenvolvimento de novas espécies. O fim dos dinossauros que dominaram a era Mesozoica, por exemplo, abriu espaço para que os mamíferos progredissem na era Cenozoica. Ao final da era Paleozoica, o solo descoberto de águas permitiu que as Angiospermas⁶ dominassem a cobertura vegetal dos continentes.

Leibniz, como engenheiro de minas, observou o comportamento do minério sob aquecimento e fusão siderúrgicos. A diferenciação ocorria por densidade, com o ferro e níquel em baixo, uma mistura na parte central e uma cobertura silicática, dita escória da siderurgia. Entendeu que assim devia ter ocorrido a diferenciação no planeta. Um núcleo de Fe-Ni, um manto mesclado e uma crosta silicática: *Ora, toda escória resultante da fusão é do gênero vítreo; e a crosta que recobria a matéria em fusão do globo e que endureceu depois da fusão deve ter-se tornado semelhante a uma escória, como sucede com metais na fornalha.* (LEIBNIZ, 1749, apud 1997, cap. 4). Ele ainda viu que a escória cerâmica, refratária, provocava uma concentração de calor e criava uma fase líquida logo abaixo da superfície silicática (ver Figura 2). A visão de Leibniz antecipou a existência no interior da Terra da descontinuidade de Moho⁷, que só seria sismologicamente comprovada dois séculos depois. É essa descontinuidade que concede à crosta terrestre um grau de liberdade, e que lhe permite mover-se harmonicamente, sob as forças astronômicas de marés.

⁶ Plantas que se reproduzem através de flores e frutos: sementes que necessitam solo para desenvolvimento.

⁷ Esta descontinuidade de ondas sísmicas no interior da Terra foi descoberta pelo sismólogo croata Andrija Mohorovicic, em 1908; está situada a cerca de 10 km de profundidade sob os oceanos e a cerca de 40 km sob os continentes. Separa a crosta do manto, podendo atingir, sob as cordilheiras, a profundidade de 70 km.

Figura 2 - As camadas do interior da Terra, com a descontinuidade de Mohorovicic⁸

Conforme nos lembra o Tarifa (2001, p.12), "existem ritmos no clima". Os ritmos atuais podem ser estendidos ao passado, como proposto por Hutton? Ou, ao estilo Leibniz, esses ritmos estariam apenas nas fases de *Equilíbrio Pontuado*? É entre a crítica de Leibniz (*Os sábios julgam em demasia o estado primitivo do globo por seu estado atual*) e a afirmação de Hutton (*O presente é a chave para o passado*) que pretendemos desenvolver uma pesquisa historiográfica e crítica da evolução do clima terrestre.

Em ciência, nenhuma pergunta é a última e nenhuma contestação é definitiva. Wegener, em seus estudos sobre a *Deriva Continental*⁹, atentou que a ciência é um processo social. Ela ocorre numa escala temporal mais longa do que a vida humana. “Caso eu morra, alguém ocupará o meu lugar. Se tu morreres, alguém ocupará o teu. O que realmente é importante é que alguém faça o trabalho”. (WEGENER, 1924, apud HALLAM, 1976).

Neste trabalho buscaremos entender padrões e causas das alterações climáticas do passado, sem perder de vista o presente. Não se trata de um momento eureka. Foi mais um processo de continuidade ao encontrarmos evidências contraditórias.

⁸ Fonte: <http://joidesresolution.org/node/1928>. Acesso em: 10 jan 2017.

⁹ A distribuição da flora *Glossopteris* e dos répteis *Mesosaurus*, entre outros exemplos, indicavam a existência de uma antiga extensão de terra firme que unia os dois continentes meridionais. As ilhas Spitzberg possuem atualmente um duro clima polar, mas tiveram um clima cálido no Jurássico. No Terciário, a Europa central desfrutava do tipo de clima das zonas chuvosas equatoriais.

1.2 – Estrutura da Dissertação.

Dissertar¹⁰ é, por meio da organização de palavras, frases e textos, apresentar ideias, desenvolver raciocínio, analisar contextos, dados e fatos. Neste momento temos a oportunidade de discutir, argumentar e defender o que pensamos utilizando-nos da fundamentação, justificação, explicação, persuasão e de provas.

- Introdução: A introdução deve apresentar de maneira clara o assunto que será tratado e delimitar as questões, referentes ao assunto, que serão abordadas. Neste momento pode-se formular uma tese, que deverá ser discutida e provada no texto, propor uma pergunta, cuja resposta deverá constar no desenvolvimento e explicitada na conclusão.

- Desenvolvimento: É a parte do texto em que as ideias, pontos de vista, conceitos, informações de que dispõe serão desenvolvidas; desenroladas e avaliadas progressivamente.

- Resultados: É onde são ressaltados tópicos avaliados no desenvolvimento e onde estes podem ser comparados com o objetivo e hipóteses.

- Conclusão: É o momento final do texto, este deverá apresentar um resumo forte de tudo o que já foi dito. A conclusão deve expor uma avaliação final do assunto discutido.

Antes do desenvolvimento, ou complementando a introdução, também optamos por esclarecer a respeito do embasamento teórico e metodologias utilizados.

Para elaboração do desenvolvimento desta dissertação tomamos por base o atualizado livro *Paleoclimates - Understanding Climate Change Past and Present*, de Thomas Cronin (2010)¹¹. Além de inúmeras citações ao mesmo, dali tiramos a ideia de apresentar, antes de nossa ênfase ao Éon Fanerozoico, uma visão do clima atual e outra do clima anterior ao Fanerozoico - o Pré-Cambriano, anterior aos 540 Ma. As cerca de 950 referências contidas no livro de Cronin (id.) fornecem um novo horizonte de informações.

¹⁰ De acordo com a normalização em vigor (ABNT - NBR 14724-2005), uma dissertação deve conter introdução, desenvolvimento e conclusão. Para a apresentação das citações, fazemos uso da norma ABNT - NBR 10520, e para a elaboração de referências a norma ABNT - NBR 6023, ambas de 2002.

¹¹ This book describes patterns and causes of past climate change. When combined with computer model simulations, paleoclimatic reconstructions are used to test hypotheses about climatic change, such as greenhouse gases, solar variability, earth's orbital variations, and hydrological, oceanographic and tectonic processes.

1.3 – Objetivo e Hipóteses.

*Amanhecer é uma lição do Universo, que nos ensina que
é preciso renascer. O novo amanhece.*
Renato Teixeira¹²

A disposição das massas continentais e dos oceanos na superfície terrestre interfere diretamente na recepção de energia solar, bem como na distribuição dessa energia, através das circulações atmosférica e oceânica. Ou seja, **a disposição dos continentes e oceanos interfere direta e preponderantemente no clima terrestre**. Para analisar o clima pretérito, para analisar a recepção de energia solar pela Terra, precisamos considerar essa disposição.

O objetivo desta pesquisa foi o de buscar entender os tempos e eventos que determinaram as grandes mudanças climáticas no Éon Fanerozoico (ver Tabela 1). Nossas hipóteses consideram as duas grandes fases: Paleozoico - em que teríamos oceanos cobrindo quase todo o planeta, com poucas terras emersas - e Mesozoico / Cenozoico - em que teríamos as bacias oceânicas e os continentes na posição atual, desde então.

Tabela 1 - Éon Fanerozoico.

Eras	Ma
Paleozoico	541
Mesozoico	252
Cenozoico	66

Escala cronoestratigráfica internacional 2016.

¹² A frase é parte da música Raízes, do compositor Renato Teixeira de Oliveira.

1.4 – Contextualização.

Hipóteses extraordinárias exigem evidências extraordinárias.
Carl Sagan

Existem diversas comprovações mineralógicas e paleontológicas da existência passada de um supercontinente, formado por crostas silicáticas (ditas continentais) com até mais de 4 bilhões de anos. Mas não existe qualquer comprovação da existência de fundos oceânicos (crostas basálticas) com mais de 250 milhões de anos. Há 252 milhões de anos, inaugurando o Mesozoico, também aconteceu a pior de todas as extinções terrestres: a do Permo-Triássico.

Os planetas conhecidos possuem ~100% de crosta continental. Podemos supor que a Terra também tenha sido coberta ~100% por crosta continental, resultante da diferenciação mineral. Assim como acontece na siderurgia, o material mais denso (ferro e níquel) ficou em baixo (núcleo da Terra) e o material menos denso (silicático, cerâmico) ascendeu (crosta terrestre).

A datação dos fundos oceânicos nos leva a entender que, há pelo menos 250 milhões de anos, algo rompeu essa crosta terrestre, restando inteiros os pedaços de continentes que foram denominados Pangea. Esses pedaços distribuíram-se sobre a superfície do planeta, de modo a restabelecer o equilíbrio dinâmico da rotação terrestre.

O que teria provocado tal estilhaçamento da crosta? O estudo do clima do último meio bilhão de anos mostra-se relacionado a todos os assuntos, mas evitamos mencionar os caminhos infrutíferos de nossos estudos. Tanto os oceanos quanto as forçantes climáticas¹³ orbitais participam de forma preponderante. A disposição dos oceanos depende da disposição dos continentes na crosta.

Os fósseis são restos ou evidências preservadas de seres vivos, principalmente em sedimentos litificados - transformados em rochas. Os fósseis fornecem dados importantes com relação a evolução biológica e reconstituição da história geográfica da Terra.

¹³ Uma forçante é uma mudança imposta no balanço da energia que entra e sai do planeta e que, tipicamente, causa uma mudança na temperatura global.

Há simbiose entre organismos e ambiente. Nas ilhas Galápagos, Charles Darwin pode entender a evolução, pela variação do bico do tentilhão (WEINER¹⁴, 1995). A evolução biológica é afetada pela proximidade: quanto maior a distância entre duas regiões, menor é sua taxa migratória, ou combinatória¹⁵. A distinção de fauna e flora da Austrália, para com outras regiões, é tão grande que levou Darwin a exclamar que, não fosse ele cristão, precisaria considerar que existiram ao menos dois deuses.

Figura 3 - Distribuição de fósseis do Pangeia¹⁶

A mesma paleontologia que comprova a proximidade, há 250 Ma, de massas continentais hoje separadas, comprova a união entre Índia e Sibéria nos últimos 100 Ma.

O mesmo sucede com os fósseis. A existência de um mesmo fóssil em duas regiões implica na proximidade entre essas regiões na época de formação dos fósseis. A semelhança de fósseis encontrados na Índia e Sibéria (MEYERHOFF, 1996, e outros)¹⁷ comprova que estas regiões estiveram unidas ao menos nos últimos cem milhões de anos (ver Figura 3). A

¹⁴ Vencedor do prêmio Pulitzer de não-ficção de 1994.

¹⁵ Quanto mais distantes são duas regiões, menor é a possibilidade de migração ou de combinação das espécies existentes nestas duas regiões, por impossibilidade física e cruzar oceanos, cordilheiras ou desertos.

¹⁶ Fonte: http://wps.pearsoned.com.au/sf3_2/130/33327/8531845.cw/content/index.html. Acesso em 14/01/2017.

¹⁷ In the case of plate tectonic models, physicists and geologists, by ignoring the biological disciplines, only weaken their own arguments. The data presented in this volume make it clear that all geologists must work together to bring the powerful tool of biogeography into tectonic reconstructions and models.

Índia não poderia estar navegando por aí (ver Apêndice E – Alternativas à Teoria da Tectônica de Placas.).

Figura 4 - A simetria de um pião¹⁸

Daniel Gabriel Santana, Igarauçu (PE), que construiu esse pião, sabe que o pião deve ser simétrico. Um Pangea, de um só lado do planeta, não permitiria que a Terra tivesse simetria e se mantivesse em equilíbrio dinâmico.

A paleontologia comprova que África e América do Sul estiveram unidas há mais de 250 Ma. Podemos supor que o Pangea¹⁹ tenha sido, então, uma parte (a terça parte) da crosta silicática terrestre, e que esta cobrisse ~100% do planeta. Seria o que poderíamos denominar Omnigea²⁰. Não existem crostas basálticas com mais de 250 Ma para provar que as crostas oceânicas existissem antes disso. Ademais, os continentes não poderiam ter derivado por aí, ou o planeta perderia o equilíbrio dinâmico²¹. Se existissem apenas estes continentes, e se estes tivessem derivado para formar o Pangea, o planeta teria perdido seu equilíbrio dinâmico (ver Figura 4), da mesma forma que um pião vibra se lhe aplicarmos um chiclete numa lateral.

Se a crosta continental (silicática) cobria ~100% do planeta, não tínhamos oceanos? Sim, temos diversas provas da existência de oceanos - mas não temos prova da existência de

¹⁸ Fonte: <http://www1.folha.uol.com.br/fol/brasil500/brinca9.htm>. Acesso em 14/01/2017.

¹⁹ Supercontinente que englobava todos os demais existentes hoje.

²⁰ Supercontinente que englobasse todos os demais existentes hoje, e mais todo o restante da esfera terrestre, como ocorre em todos os demais planetas conhecidos.

²¹ A crosta tem 0,5% da massa do planeta. O pedacinho de chumbo usado para balancear a roda de um automóvel - e evitar a incômoda vibração na direção - pode pesar menos de 0,1% do peso da roda.

crosta oceânica (basáltica) com mais de 250 Ma. A paleontologia nos mostra que todos os atuais continentes estiveram sob as águas - encontramos fósseis marinhos até nas altas montanhas. Ou seja, também podemos considerar um passado com ~100% de crosta silicática (ver Figura 5) e quase totalmente coberta por águas oceânicas²².

Figura 5 - As crostas da Terra e de Vênus²³

A crosta resultante da diferenciação siderúrgica da formação do planeta cobre 100% de Vênus. Na Terra mais de 60% da crosta é recente (< 250 Ma), e é encontrada nas partes cobertas pelos oceanos.

Na fotossíntese, a liberação de oxigênio acontece pela quebra da molécula de água. "As algas, que produzem mais oxigênio do que consomem, levaram nossa atmosfera a conter mais de 30% de oxigênio há 300 Ma" (MEDIIVILLA²⁴, 2004, p.63). Esse volume de oxigênio permitiu a existência de insetos gigantescos e de imensos vegetais. Florestas com caules sem anéis (água sempre presente), com cascas distintas (resistentes à água salgada), raízes superficiais (solo raso). A articulação das patas dos grandes lagartos não era compatível com a dos crocodilos, mas com as articulações de lagartos que, hoje, só vivem em árvores²⁵. Eram compatíveis com articulações necessárias para subir e descer de árvores, uma vez que o chão das florestas de então estaria constantemente alagado (ver Apêndice F – Conexões no

²² O volume de água nos oceanos atuais daria para cobrir todo a esfera do planeta com um oceano de profundidade média de 3 km. Apenas os relevos mais altos que isso estariam fora d'água.

²³ Ilustração: Copyright Walter Myers.

²⁴ O livro da química e professora María Jesús Mediavilla Pérez, que reside no sopé de um vulcão das Ilhas Canárias, vai além da natureza do ar e possíveis alterações ambientais, uma vez que ela fala de uma atmosfera e de um clima em câmbio contínuo.

²⁵ A ilha de Górgona, Colômbia, é infestada por serpentes. Ali, o lagarto azul só sobrevive nas árvores.

Permiano.). Com tal quantidade de oxigênio na atmosfera, a simples queda de um galho bastaria para ocasionar um incêndio. As florestas somente sobreviveriam inseridas na água.

As plantas de então eram gimnospermas, que permitiam a polinização pelo vento, sem necessidade de terra seca.²⁶ E os grandes depósitos de carvão? Podem ter ocorrido nas glaciações. Uma vez que a cobertura oceânica estivesse congelada, os incêndios poderiam propagar-se e queimar vastas regiões. Com o degelo das épocas interglaciais, todo o carvão formado pelas queimadas seria acumulado em veios, como os encontramos hoje.

Foi diante desse contexto que construímos nossas hipóteses para o desenvolvimento destes estudos sobre o clima. Água cobrindo quase todo o planeta no Paleozoico, por entre 540 e 250 Ma. A partir daí, no Mesozoico, teríamos a formação das bacias oceânicas, e os continentes na posição atual, desde então.

²⁶ As angiospermas, com flores e frutos, exigem a existência de terra seca, ambiente que só viria ser viável quando as águas oceânicas escoaram para os buracos deixados pelo rompimento da crosta silicática.

2 – REFERENCIAL TEÓRICO E METODOLÓGICO.

*Caro leitor, se estás cansado deste procedimento tedioso, tenha pena de mim,
pois fui obrigado a lidar com ele pelo menos setenta vezes.*
Johannes Kepler.

2.1 – Embasamento Teórico.

Embasamento teórico é informação baseada em algum estudo científico e não fundamentada em senso comum. Em nosso caso, o embasamento teórico tem vindo *a posteriori*. Na medida em que buscamos argumentos para debate e em que exercitamos alguma hipótese, temos encontrado teorias e embasamento para a construção desse texto.

O pensamento filosófico move-se numa dialética que vai do diverso ao uniforme, para voltar do uniforme ao diverso. Diante de tal contínua reviravolta, é perda de tempo propor um problema de origem. Pouco importa que o conhecimento comece pela percepção do diverso ou pela constituição do idêntico, já que o conhecimento não se detém nem no diverso nem no idêntico. "A todo conhecimento deve juntar-se um problema, uma perspectiva de pesquisa. O conhecimento é um desejo alternativo de identidade e diversidade" (BACHELARD, 2009, p.11).

Adotamos e fazemos nosso o prólogo de Vernadsky (1926, p.48-49)²⁷: "Ao não aceitar a necessidade lógica de assumir um começo para a vida nem a repercussão das etapas cósmicas do planeta sobre os fenômenos geológicos - em concreto, a existência de um estado anterior ígneo-líquido ou gasoso -, o autor proscree tais premissas do campo de suas investigações." Assim é que proscrevemos o começo da vida e a formação do planeta desta pesquisa - não precisamos delas. Nosso foco é o Fanerozoico, no qual o posicionamento dos continentes e oceanos, o movimento lunar, a vida e o clima convergem para a atualidade.

Nosso embasamento teórico passa pelo geólogo norte-americano Frank Bursley Taylor (1860-1938), que sugeriu a ação das forças de maré e até mesmo um choque lunar, como responsáveis pela quebra e movimentação da crosta terrestre e soerguimento das cordilheiras. "Wegener desenvolveu suas ideias independentemente. Realizou uma prolixa análise

²⁷ Esse autor ressalta que fenômenos geológicos não podem ser interpretados como um acúmulo de acidentes. Devemos manter a visão dos mesmos enquanto fenômenos planetários, cujas regularidades não são um patrimônio exclusivo da Terra; também devemos ter a compreensão da estrutura terrestre como um mecanismo cujas partes configuram um conjunto harmônico, um todo indivisível.

geofísica – coisa que Taylor não fez – e obteve uma considerável quantidade de provas²⁸. A relação de Taylor com Wegener é similar à de Wallace com Darwin²⁹.” (HALLAM, 1976, p.19).

Figura 6 - Esquema da descontinuidade de Mohorovicic³⁰

A descontinuidade de Moho é uma fase líquida entre a crosta e o manto.

O embasamento teórico desta pesquisa precisa considerar um grau de liberdade crustal pela descontinuidade subcrustal de Moho (ver Figura 6) comprovada pelo meteorologista croata Andrija Mohorovicic (1857-1936), e os limites de aproximação entre corpos celestes formulados pelo astrônomo francês Edouard Roche (1873) (ver Apêndice B - O limite de Roche.) – formulações comprovadas e utilizadas pela NASA.³¹ Se a Lua, por exemplo, se aproximasse até cerca de 7.300 km da Terra, a Lua colapsaria por forças gravitacionais de marés. Entretanto, bastaria que ela se aproximasse bem menos para que entrasse em colapso o elo mais fraco entre a Terra e a Lua. Esse elo mais fraco seria a crosta da Terra, que "independente" do planeta ante a presença da Moho, poderia rachar ou implodir ante as forças gravitacionais da maré lunar.

“A metodologia está conformada por procedimentos ou métodos para a construção da evidência empírica.” (SAUTU et al., 2005, p.39). A metodologia se apresenta como um

²⁸ O meteorologista germânico Alfred Lothar Wegener (1880-1930) propôs a Teoria da Deriva Continental na segunda década do século XX, baseado em similaridades geométricas, geológicas e paleontológicas em ambos os lados do Oceano Atlântico.

²⁹ Respectivamente quanto à deriva continental e à evolução das espécies, enquanto Wegener e Darwin apresentaram comprovações, Taylor e Wallace não o fizeram satisfatoriamente.

³⁰ Fonte da ilustração: <https://www.e-education.psu.edu/earth520/node/1825>. Acesso em 14/01/2017.

³¹ O limite de Roche indica a distância mínima que um satélite pode aproximar-se de um corpo maior, sem se romper. Ver <http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node7.htm>.

conjunto de métodos que tem por função adaptar os preceitos teóricos à produção de dados. A escola da perspectiva metodológica deve ser justificada, quer dizer, o investigador deve explicar as razões pelas quais considera que os procedimentos selecionados são pertinentes para obter evidências empíricas daquilo que deseja investigar.

2.2 – Metodologia da Crença de Charles Peirce.

Quanto ao método adotado em nossa pesquisa bibliográfica: nossa perspectiva teórica orienta-se pelos métodos da crença de Charles Sanders Peirce (1839-1914). Estamos buscando – para escolha dos assuntos principais e identificação das observações científicas – pelo empirismo retratado na memória terrestre. Precisamos de pragmatismo – excesso de positivismo. Nada melhor do que fazer uso de uma metodologia proposta pelo cientista considerado *pai do pragmatismo*.

Peirce também é considerado o pai da semiótica. Ele ainda foi químico, físico, filósofo, linguista, enólogo; deixou mais de 90 mil páginas escritas. Por mais de 30 anos Peirce desenvolveu trabalhos em astronomia e dedicou-se a pesquisas geodésicas para o USCS (United States Coast Survey). Por sua atuação no USCS, e por esse seu conhecimento enciclopédico, podemos dizer que Peirce foi um Geógrafo. Em suas palavras inspiradoras “existem duas maneiras de nos distanciarmos da verdade: uma é considerá-la impossível e a outra é considerar que já a conhecemos”.

De acordo com os métodos da crença de Peirce (1877, apud PEIRCE, 1986), nossos pensamentos contemplam os estágios de crença e da dúvida. O incômodo – excitação, irritação – da dúvida nos leva a buscar e abrigarmo-nos na satisfação da crença. Quatro seriam os métodos pelos quais a crença pode substituir a dúvida. Três dos métodos seriam dependentes do raciocínio humano:

- A tenacidade individual – confiar nas crenças já estabelecidas: sempre foi assim, creio por que creio, e não preciso dar satisfações;
- A coerção da autoridade – cale-se ou morra, creio por que alguém importante o autorizou – seja este o padre, o professor, o general ou o santo; e
- O apriorismo – modismo, conceitos existentes *a priori*; nunca pensei muito nisso, ouvi falar, li algo a respeito, e só por isso creio.

Para um quarto método, pragmático, faz-se necessário recorrer a realidades ou experiências externas – sobre as quais nosso pensar não tenha efeito: este seria o método científico. Se a maçã de Newton cai, independente do que pensemos, então é uma crença científica. Existem, e podemos constatar, fósseis de *Glossopteris*³² nos dois lados do Oceano Atlântico; trata-se, portanto, de uma crença científica. Podemos medir, e conferir, que a dorsal meso-atlântica se alinha pela cota aferida -914 m das plataformas continentais - o que torna esta crença científica.

2.3 – Métodos em Paleoclimatologia.

Os métodos em paleoclimatologia incluem núcleos (testemunhos) de gelo, dendroclimatologia (anéis de árvores), paleoceanografia (sedimentos marinhos), paleolimnologia (sedimentos lacustres), escleroclimatologia (corais), espeleotemas (deposições em cavernas), evaporitos (sulfatos, halogenetos, boratos, carbonatos formados a partir de sal dissolvido), palinologia (pólen), bioturbação (tendência a misturar sedimentos), paleossolos (solos antigos), ritmitos (alternância regular de deposição), entre outros.

"Os núcleos de gelo forneceram uma riqueza de evidências sobre temas tão diversos como a aridez global e poeira atmosférica elevada durante os períodos glaciais, o papel do vapor de água atmosférico tropical durante a rápida mudança do clima, a variabilidade solar, queima de biomassa e outros." (CRONIN, 2010, p.30).

Os espeleotemas, principalmente de calcita, precipitada a partir de águas subterrâneas, podem indicar histórias de movimentação atmosférica e pluviosidade por 500.000 anos. "Os esqueletos de corais e moluscos, calcíticos, em camadas anuais, são testemunhos do clima no Quaternário" (CRONIN, 2010, p.30).

Os estudos geocronológicos³³ - referentes à escala de tempo geológico - requerem experiência em estratigrafia e métodos de datação geológica: datação radiométrica (decaimento α e β); datação por radiocarbono ($^{14}\text{CO}_2 \rightarrow ^{14}\text{NO}_2 + \beta$); programas de calibração do radiocarbono (aumento de precisão); decaimento do Chumbo-210 e Césio-137 (meia-vida

³² *Glossopteris* é o maior e mais conhecido gênero da extinta ordem de samambaias com sementes, posteriormente incluídos entre as gimnospermas.

³³ A geocronologia é a ciência que utiliza um conjunto de métodos de datação para determinar a idade das rochas, fósseis, sedimentos e os diferentes eventos da história da Terra.

de 22,8 e 30,3 anos); contagem de camada anual de árvores (divergência e comprimento de segmento, 500 anos); eventos vulcânicos (1000 anos, como as cinzas do Vedde e do Toba); ajustes astronômicos (insolação, precessão, excentricidade, obliquidade); modelos geocronológicos (equações polinomiais, pontos de amarração); métodos de correlação (Estatística); análises espectrais (CRONIN, 2010)³⁴.

Um proxy é uma variável a partir da qual se pode obter outra variável de maior interesse. Assim, as "temperaturas proxy" encontradas a partir das larguras dos anéis de árvores ou dos núcleos de gelo são usadas em climatologia para recriar registros de paleotemperaturas. O correlacionamento entre proxies permite uma melhoria e sofisticação nos métodos de calibração.

Características atmosféricas do passado podem ser analisadas a partir de isótopos estáveis (S, C, H, N). A temperatura do ar de superfície a partir de núcleos de gelo, de espeleotemas, sedimentos oceânicos e lacustres. A precipitação em uma região específica pode ser inferida a partir de anéis de árvore. A circulação atmosférica e o vento, a partir de aerossóis em núcleos de gelo. A química atmosférica, as concentrações de gases do efeito estufa, e as concentrações de metano (CH₄) são reconstruídos a partir do ar preso nos núcleos de gelo da Antártica e da Groenlândia (CRONIN, 2010).³⁵

Nas características oceânicas, a temperatura da superfície do mar pode ser avaliada a partir de métodos químicos em sedimentos planctônicos. O vapor d'água inferior advém das proporções Mg/Ca em foraminíferos bentônicos e ostracodes. A salinidade, a partir de biomarcadores de algas e do excesso de deutério. A circulação oceânica pode ser inferida através das mudanças climáticas no Quaternário. A produtividade vegetal, pelo CO₂ atmosférico (CRONIN, 2010)³⁶.

Em termos de criosfera, as lâminas de gelo continental podem ser avaliadas pelas feições geomorfológicas e por isótopos de oxigênio em foraminíferos marinhos; as geleiras pelas morainas e sedimentos lacustres; o gelo do mar e icebergs a partir de camadas de sedimentos no oceano. Na litosfera, avaliamos a superfície dos continentes pela paleovegetação (CRONIN, 2010, p.46-47). De acordo com os fósseis vegetais encontrados em cada terreno, podemos avaliar o perfil topográfico de então (ver Figura 7).

³⁴ Sumário do conteúdo das páginas 31-38 da referida fonte.

³⁵ Sumário do conteúdo das páginas 40-43 da referida fonte.

³⁶ Sumário do conteúdo das páginas 44-46 da referida fonte

Figura 7 - Esquema de tipos de vegetação de um perfil topográfico

Representação esquemática dos tipos de vegetação para um perfil topográfico desde a Serra da Mantiqueira à Serra do Mar, biodiversidade dos tipos de vegetação local (Radambrasil, 1983).

A modelagem matemática de paleoclimas, bem como do clima presente e futuros fazem uso de leis físicas fundamentais da conservação do momento, massa e energia, equações de fluxo de fluido, e relações conhecidas empiricamente (evaporação, umidade). Thomas Cronin (2010, p.47) nos apresenta diversos tipos de modelos climáticos: modelos de equilíbrio energético (temperatura e balanço radiativo da Terra, gases de efeito estufa, partículas); modelos de circulação geral atmosférica com acoplamento oceano-atmosfera (gases, aerossóis, emissões vulcânicas, radiação solar); modelos glaciológicos (capas de gelo, precipitação, fusão basal, elevação do nível do mar); modelos bioquímicos, como o GEOCARB³⁷ (BERNER, 2004³⁸). A perspectiva é a de um aperfeiçoamento cada vez maior das previsões.

A atmosfera não para no Equador, mas o hemisfério sul (ver Figura 8) tem estado relativamente isolado dos maiores centros de avanço científico e sofre com uma esparsa rede de estações meteorológicas. Somente 20% do hemisfério sul é coberto por terra ou capas de gelo, comparado aos cerca de 40% do hemisfério norte. "A temperatura do ar no inverno

³⁷ Disponível em <http://climatemodels.uchicago.edu/geocarb/geocarb.doc.html>.

³⁸ Extraordinary changes in the atmosphere that have occurred during the Phanerozoic Eon. The author present his GEOCARB models comprehensively. Processes of the Long-Term Carbon Cycle: Chemical weathering of silicates; Organic matter and carbonate burial and weathering; Degassing of carbon dioxide and methane. Atmospheric carbon dioxide and O₂ over Phanerozoic Time.

sobre a fina cobertura de gelo do Oceano Ártico é de cerca de -35°C comparado com -70°C ou menos sobre o centro do continente Antártico" (O'HOBBS et al., 1998³⁹, p.2).

Figura 8 - Mapa físico do hemisfério sul terrestre⁴⁰

Cerca de 80% do hemisfério sul, onde o português é a língua mais falada, é coberto por água líquida.

"Está claro que conhecemos mais sobre alguns continentes do que sobre outros; que América do Sul e Antártida são relativamente menos entendidos em geral; e que a consideração de climas futuros precisa ser especulativa" (O'HOBBS et al., 1998, p.4). "O entendimento do clima do sul da África é dificultado pelo fato de os serviços meteorológicos dos mais de 10 países da região não se relacionarem" (id., p.5). "Austrália é uma terra de extremos; afora Antártida, é o continente mais seco" (id., p.63). "De um modo geral, na Austrália chove no norte no verão e no sul no inverno" (id., p.65). "Circulações atmosféricas em uma variedade de escalas são consideradas, da escala planetária à mesoescala, reconhecendo-se que é impossível isolar uma de outra" (id., p.72). El Niño Southern Oscillation (ENSO) é o fator climático de caráter global mais importante para a América do Sul. El Niño está também associado com dramáticas alterações no regime de precipitações na costa do Pacífico. "Evidências (sedimentos de inundações) sugerem que El Niño vem ocorrendo periodicamente na região ao menos nos últimos 5000 anos" (id., p.124). "Os conceitos básicos de análise sinóptica e interpretação de imagem de satélites foram

³⁹ The southern hemisphere atmosphere has been relatively neglected in a global context, but scientists are becoming more aware of its particular significance for global change, and with the recognition of the role of the oceans in low-frequency climatic variability.

⁴⁰ Fonte: <https://observalinguaportuguesa.org/paises-do-hemisferio-sul/>. Acesso em 16/01/2017.

desenvolvidos para médias latitudes (e do hemisfério norte) e podem não ser apropriados para a região Antártica" (id., p.142).

2.4 – Geoquímica no Longo Prazo.

Num assunto tão amplo quanto o deste projeto de pesquisa, foi necessário buscar por sínteses até nas dúvidas. Nas palavras do químico Jean Chrétien Ferdinand Hoefer (1811-1878): “As experiências mais antigas sobre a composição dos corpos⁴¹ são sintéticas, e não analíticas. O espírito humano começa, como a ciência, pela síntese.” (HOEFER, 1869, apud BACHELARD⁴², 2009, p.53). Assim foi que começamos nossos estudos pelas sínteses. E é na síntese geoquímica que podemos acompanhar a evolução crustal no longo prazo.

"A composição química atual da crosta terrestre quantitativa e qualitativamente parece dever-se à ação conjunta dos processos geológicos inalterados ao largo de todos os tempos geológicos, ademais da persistência das propriedades dos elementos químicos no curso completo dos ditos tempos" (VERNADSKY, 1926, p.57). Donald Canfield (2014, p.99) comenta o livro de Vernadsky: "*His prime concern was to understand how life worked as a geological force, his interest in Earth history was secondary.*" Ou seja, precisamos considerar a vida como uma força geológica, e climatológica. A vida, entre outras coisas, responde pela proporção de oxigênio na atmosfera - e pelas consequências disso. A vida possui, geograficamente, uma interdependência com o meio ambiente. "Ela, a vida, alimenta-se de entropia⁴³ tomada com sinal negativo" (SCHRODINGER, 1944. p.82). Vivemos da organização do meio ambiente (e vice-versa). Vivemos de nos alimentar de matéria no estado extremamente bem ordenado de compostos orgânicos mais ou menos complicados, e não de polpa de carvão ou diamante.

A regra de Oddo-Harkins (ver Gráfico 1) diz respeito ao fato de a abundância dos elementos com número atômico par (como o carbono) serem mais comuns do que a de elementos com número atômico ímpar (como o nitrogênio).

⁴¹ Ele fazia referência a compostos químicos.

⁴² Gastón Bachelard (1884-1962) é considerado o pai da epistemologia moderna.

⁴³ Medida de organização de um corpo ou substância. No ponto zero absoluto de temperatura (-273,15°C), a entropia de qualquer substância é zero.

Gráfico 1 - A regra de Oddo-Harkins (1914)⁴⁴

As investigações da astrônoma Cecilia Payne (1925) trazem o seguinte quadro da sucessão dos elementos químicos estelares em ordem decrescente: Si - Na - Mg - Al - C - Ca - Fe (>1%; 1ª década) Zn - Ti - Mn - Cr - K (>0,1%; 2ª década). "Detecta-se uma clara analogia com a sucessão sujeita à mesma ordem, dos elementos químicos da crosta terrestre: O, Si, Al, Fe, C, Na, K, Mg" (apud VERNADSKY, 1926, p.58-59).

As cianobactérias⁴⁵ foram os "primeiros organismos fotossintetizantes a usar a água como fonte de elétrons" (CANFIELD, 2014⁴⁶, p.42). Existem na atmosfera $3,7 \times 10^{19}$ moles⁴⁷ de oxigênio. Se todo esse oxigênio fosse resfriado até tornar-se líquido, ele formaria uma camada de uns 6 cm de profundidade sobre a totalidade da superfície do planeta. A partir de imagens de satélites e medições em superfície (ver Figura 9), estimamos que a taxa líquida de produção é de cerca de $8,8 \times 10^{15}$ moles de carbono / ano, o que equivale à produção anual de crescimento das algas, plantas e cianobactérias do planeta.

⁴⁴ Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Abundance_of_the_chemical_elements Acesso em 29/2/2016.

⁴⁵ Cianobactérias são bactérias que obtêm energia a partir de fotossíntese. São indevidamente chamadas de algas azuis, uma vez que as cianobactérias são procariontes (unicelulares) enquanto as algas são eucariontes (múltiplas células individualizadas por membranas).

⁴⁶ Describing which process, both biological and geological, act to control oxygen levels in the atmosphere, the author traces the records of oxygen concentrations through time. Readers learn about the great oxidation event, the tipping point 2.3 billion years ago when the oxygen content of the Earth increased dramatically.

⁴⁷ Mol é a quantidade de substância de um sistema que contém tantas entidades elementares quanto são os átomos contidos em 0,012 quilograma de carbono-12.

Figura 9 - Imagem de satélite da Índia e sudeste asiático⁴⁸

Imagem mostrando a cobertura florestal em verde.

Ao compararmos essa taxa primária de produção com a massa de oxigênio na atmosfera, calculamos que "todo o oxigênio atmosférico pode ser gerado em meros 42 mil anos" (CANFIELD, 2014, p.57). A atmosfera contém 0,49% do ciclo do oxigênio, enquanto 0,01% está nos seres vivos. Ainda assim, produzindo oxigênio, a vida é um fator de mudanças geológicas e climáticas (ver Figura 10).

⁴⁸ Em <https://mongabay-images.s3.amazonaws.com/14/1029-2-large-forest-extent-map.png> . Acesso em 16/1/2017.

Figura 10 - Reservatórios e fluxos do ciclo do oxigênio atmosférico ⁴⁹

O oxigênio contido na litosfera, foi depositado sob a forma de carbonatos⁵⁰, principalmente no éon Fanerozoico (ver Tabela 2). Atualmente a maior deposição de carbonatos realiza-se nos mares quentes e pouco profundos (equatoriais), já que o carbonato depositado em zonas frias e profundas tende a dissolver-se. Originalmente, o número de seres vivos que podiam participar na precipitação de carbonatos era mais reduzido; "há uns 570-550 milhões de anos, alguns organismos aquáticos começaram a utilizar o carbono dissolvido em água para formar com ele suas conchas e estruturas esqueléticas de carbonato" (MEDIIVILLA, 2004, p.41).

Calcário é uma rocha sedimentar que contém minerais com quantidades acima de 30% de carbonato de cálcio. Hoje "as rochas calcárias recobrem 40% da superfície, representam 4% da crosta terrestre em peso, e contém cerca de 80% de todo o carbono do planeta" (MEDIIVILLA, 2004, p.42).

⁴⁹ Por Cbusch01 em Wikipédia inglesa, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2106084>

⁵⁰ Os carbonatos são sais inorgânicos ou seus respectivos minerais que apresentam na sua composição química o íon carbonato CO_3^{2-} . Exemplo: Carbonato de Cálcio ou CaCO_3 .

Tabela 2 - Proporcionalidade das formas de carbono superficial terrestre.⁵¹

Formas sob as quais encontramos o carbono da Terra		
1	Carbonato nos sedimentos	107.000,0
2	Matéria orgânica sedimentar	27.000,0
3	Dissolvido nos oceanos (CO ₂ e HCO ₃ ⁻)	75,0
4	Carvão ou petróleo recuperáveis	7,1
5	Carbono retido no solo (humus)	5,4
6	Carbono na atmosfera	1,3
7	Matéria orgânica nos seres vivos	1,0
Quantidade de carbono superficial da Terra em relação ao carbono contido nos seres vivos, que foi tomado		

Que acontece quando as plantas morrem? Bactérias e fungos irão decompor o material dos vegetais mortos, usando oxigênio para fazer isso. De uma maneira geral, seja na terra ou no mar, é estimado que 99,9% da produção primária terrestre é decomposta. O pouco restante é enterrado como matéria orgânica não reagente em sedimentos marinhos ou lacustres, os quais vão ser litificados posteriormente. Enfim, apenas a matéria orgânica que é enterrada em sedimentos e transformada em rochas escapa de reagir com oxigênio. "Há uma outra fonte de oxigênio que deve ser considerada: um processo microbial anaeróbico chamado redução de sulfato, que respira oxigênio e produz sulfeto" (CANFIELD, 2014, p.58). "As bactérias redutoras de sulfato fazem parte de uma classe de micro-organismos que realiza a redução dissimilatória de sulfato em anaerobiose⁵², e são importantes para o ciclo microbiológico do enxofre já que elas reduzem o enxofre presente no ambiente na forma de sulfato a sulfeto" (POSTGATE, 1979; TANG⁵³, 2009, apud RAMOS⁵⁴, 2013, p.12). O ciclo de oxigênio de curto prazo é regulado pela fotossíntese e pela respiração de organismos. O ciclo geológico de longo prazo é regulado pelo ciclo das rochas.

⁵¹ Fonte: tabela 1.1, em MEDIAVILLA, 2004, p.40.

⁵² Ambiente livre de oxigênio.

⁵³ This article provides an overview of the microbiology, biokinetics, current and potential applications of the bacteria of sulphur cycle and the reactions which are carried out by these versatile microorganisms.

⁵⁴ Estudo cinético de crescimento de bactérias redutoras de sulfato em reator de leito fixo avaliando o efeito da concentração do acceptor final de elétrons (sulfato) no aumento da população microbiana.

Tabela 3 - Fracionamento de isótopos de enxofre.⁵⁵

Isótopos estáveis de enxofre (S)	% de Abundância Natural	Diferença de Unidade de Massa	Raio ³² S	Raio ³³ S
³² S	95,02	0	1	22,570071
³³ S	4,21	1	0,044306	1
³⁴ S	0,75	2	0,007893	0,178147
³⁶ S	0,02	4	0,000210	0,004751

Nas rochas do Arqueano (em rochas com mais de 2,3 bilhões de anos), diverso das proporções habituais (ver Tabela 3), os isótopos não se comportaram como esperado. "Os fracionamentos eram anômalos - independentes de massa" (CANFIELD, 2014, p.92). A maior parte da luz UV que provocaria o fracionamento independente de massa de gás SO₂ é absorvida hoje pelo ozônio da atmosfera terrestre. "Ozônio é produzido a partir de oxigênio atmosférico. Se você tirar o oxigênio, você tira o ozônio, e permite o fracionamento de enxofre independente de massa observado por James Farquhar" (2001⁵⁶, apud CANFIELD, 2014, p.94). Ou seja, no Arqueano não havia oxigênio atmosférico suficiente para formação de uma ozonoesfera⁵⁷.

A maior parte dos aerossóis da estratosfera procede dos vulcões. O tempo de residência de uma partícula na atmosfera será maior quanto maior seja a altura alcançada. Os vulcões que mais afetam a estratosfera são os de tipo explosivo (injetam pó e gases vulcânicos diretamente na estratosfera) e os que se encontram situados em zonas intertropicais (maior ascensão do ar à estratosfera, e onde as correntes de ar se deslocam em direção ao Norte e ao Sul). As partículas vulcânicas provocam aumento na temperatura da estratosfera e diminuição na temperatura média superficial. "A principal causa dos resfriamentos superficiais são os gases de enxofre, tais como o dióxido de enxofre SO₂, que são injetados ou transportados à estratosfera, onde acabam se transformando em sulfato (branco), que permanece ali durante vários anos modificando o albedo⁵⁸ do planeta" (MEDIÁVILLA, 2004, p.262).

⁵⁵ Tabela produzida pelo autor a partir dos dados fornecidos por Donald Canfield (2014, p.91-92).

⁵⁶ Clever photochemical experiments linking the mass-independent sulfur isotope signal to photochemical reactions with UV radiation.

⁵⁷ A ozonoesfera é uma região da estratosfera terrestre que concentra altas quantidades de ozônio.

⁵⁸ Albedo é a razão entre a quantidade de luz que é difundida ou refletida por uma superfície e a quantidade de luz incidente sobre a mesma superfície, planeta ou outro corpo celeste.

Enquanto os compostos iônicos são potencialmente infinitos e invariavelmente sólidos em temperaturas normais, os agregados moleculares são muitas vezes tão pequenos que podem formar gases e líquidos. "De um modo geral, os compostos moleculares são a face amena da natureza, e os compostos iônicos a face dura. Poucas distinções tornam isso mais claro do que aquelas entre a face amena da Terra – seus rios, seu ar, sua grama, suas florestas, todos de natureza molecular – e as ásperas subestruturas do relevo, que são em sua maior parte iônicas" (ATKINS, 1996⁵⁹, p.124).

A criosfera inclui toda a água congelada. "O balanço de massas das camadas de gelo é o parâmetro criosférico mais importante em termos de passado e futuro das mudanças climáticas" (CRONIN, 2010, p.8).

As evidências sugerem que os mantos de gelo do Ártico e da Antártida experimentaram flutuações dinâmicas em termos de volume, em escala de tempo de milhões de anos. A história climática de longo prazo está ligada aos processos tectônicos e topográficos, e às mudanças na distribuição do oceano-terra que causam. "A biosfera - é central para ciclos biogeoquímicos globais de carbono, nutrientes e outras substâncias químicas que influenciam o clima, direta ou indiretamente" (id., p.15).

Assim é, concluímos, que precisamos considerar a geoquímica no longo prazo. Esta, ao afetar processos geológicos, também afeta processos climáticos. E vice-versa.

⁵⁹ O Reino Periódico, da Tabela Periódica, é um lugar sistemático. Detalhando sua geografia, sua história e instituições governamentais, o autor demonstra como as similaridades físicas podem apontar para afinidades profundas, e como a localização de um elemento pode ser utilizada para prever suas propriedades.

3 – SISTEMAS CLIMÁTICOS.

Everything is everywhere. But the environment selects.
Laurens Baas-Becking.⁶⁰

3.1 – O Sistema Climático da Terra Hoje.

Entre os fatores que influem nas mudanças climáticas estão a intensidade da atividade solar, o campo geomagnético e os raios cósmicos, a erupção vulcânica, a órbita terrestre e os gases estufa. Segundo Maruyama (2009, p.117)⁶¹, existem dados indicativos de que "a redução de 1/3 do campo geomagnético aumenta em dez vezes a quantidade de incidência de raios cósmicos", o que acarreta em um aumento da nebulosidade (ver Figura 11). Os cálculos mostram que uma variação de 1% da nebulosidade influi em 1°C da temperatura atmosférica.

Figura 11 - Esquema do balanço energético anual estimado para a superfície da Terra⁶².

Um exercício sobre a perda de energia interna pela Terra é apresentado no Apêndice G – Perda de energia pela Terra.

⁶⁰ Frase contida no livro Geobiology, de Laurens Baas-Becking, 1934, apud Canfield, 2014, p.161, note 12.

⁶¹ As discussões dos principais fatores que causam o aquecimento da Terra não devem restringir-se apenas ao Sol ou ao dióxido de carbono. E se não for nenhum dos dois? Este livro discute o clima pretérito e presente.

⁶² Disponível em: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-1.html.

A "constante" de radiação solar realmente varia diariamente, durante ciclo de manchas solares de 11 anos, e em escalas de tempo mais longos, com implicações ainda pouco conhecidas para o clima. Os aerossóis produzidos pela poluição humana têm um impacto de curto prazo sobre a radiação refletida, mas os eventos vulcânicos explosivos podem ejetar aerossóis acima das camadas de nuvens e afetar a radiação e temperatura da terra por um a três anos, dependendo do evento.⁶³

A troposfera é a camada atmosférica que se estende desde a superfície até uma altura de 10-15 km e experimenta variabilidade diária, sazonal e de longo prazo na temperatura, na cobertura de nuvens, circulação (ver Figura 12), e em outras características que dominam as condições médias climáticas regionais. Ocorre um forte gradiente térmico do Equador aos pólos. A circulação atmosférica numa direção norte-sul é chamada de fluxo meridional, ao passo que o fluxo leste-oeste é conhecido como fluxo zonal. (CRONIN, 2010)⁶⁴.

Figura 12 - Células de circulação primária e cinturões de vento prevalentes na Terra.

65

⁶³ Erupções do Laki, na Islândia, em 1783 e 1784 causaram três anos de rigorosos invernos e falta de alimentos na Europa, colaborando para fomentar a Revolução Francesa de 1789.

⁶⁴ Sumário do conteúdo das páginas 2-4 da referida fonte.

⁶⁵ Disponível em: http://www.oocities.org/rjwarren_stm/2P4/HadleyCell.html. Acesso em 29/02/2016.

A Zona de Convergência Intertropical ZCIT (Intertropical Convergence Zone ITCZ) situa-se no hemisfério norte, mas esta se desloca ao sul do equador sazonalmente, com o ângulo de incidência dos raios e das forças gravitacionais solares. A circulação atmosférica zonal no Pacífico equatorial é denominada células de Walker. Em termos simplistas, as células de Walker formam um grande laço de baixa latitude através do Oceano Pacífico.

A hidrosfera inclui a água contida nos oceanos do mundo (97,3%); camadas de gelo e geleiras (2,1%); água subterrânea em aquíferos (0,6%); e as águas superficiais presas na biosfera (<0,1%). A água na crosta terrestre também é distribuída por vulcões e fontes hidrotermais através de processos tectônicos. O ciclo da água constitui o núcleo do sistema climático global, e o fluxo de água é controlado por processos centrais para a paleoclimatologia: evaporação (em grande parte nos oceanos tropicais), a condensação de vapor d'água na atmosfera na forma de nuvens, precipitação, neve, gelo marinho e formação de gelo glacial, e reciclagem na litosfera. (CRONIN, 2010)⁶⁶.

A água é o maior absorvente de calor da Terra; mais da metade do total da energia solar que chega à superfície é usada para evaporá-la; depois "o vapor voltará a condensar-se cedendo seu calor ao meio e originando a neblina, as chuvas etc." (MEDIÁVILLA, 2004, p.266). "A água contribui com cerca de 90-95% do total de nossa estufa; o resto, entre 5-10%, seria responsabilidade do CO₂ e de alguns gases traço. O CO₂ não pode absorver mais radiação do que a que existe e, na atualidade, o gás já está se acercando de 100% do infravermelho que é capaz de obstruir: o ponto de saturação. Se a concentração de CO₂ duplicasse na atmosfera, o efeito estufa devido ao CO₂ somente subiria uns 10-15%, o que significa um aumento do efeito estufa total de tão somente 1%" (id., p.271).

O transporte de massa oceânica é medido em Sverdrups ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$), em homenagem ao oceanógrafo pioneiro Harald Sverdrups. Essa unidade é usada para medir o volume de água que flui por segundo através de um ponto teórico. Correntes superficiais no oceano são afetadas pelo atrito e turbulência (ver Figura 13). O termo viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*) refere-se ao atrito interno em qualquer parcela de fluido.

⁶⁶ Sumário do conteúdo das páginas 3-4 da referida fonte.

Figura 13 - Correntes superficiais oceânicas

As correntes quentes estão em vermelho e as frias em azul.⁶⁷

A teoria Ekman para correntes geradas pelo vento sustenta que as correntes são uma combinação da força de Coriolis⁶⁸ e do atrito do vento agindo em camadas oceânicas superficiais. O Transporte de Ekman, parte dessa teoria de movimento, é o termo usado para o transporte em 90° da camada de superfície (profundidade na qual o vento penetra) devido a forças do vento. A direção do transporte é dependente do hemisfério. No hemisfério norte este transporte é a um ângulo de 90° à direita da direção do vento, e no hemisfério sul ele ocorre a 90° à esquerda da direção do vento, em virtude da rotação planetária.

O produto do gradiente de pressão (densidade, gravidade e profundidade) e força de Coriolis é chamado fluxo geostrófico, no qual a circulação do oceano se apresenta ao longo isóbaras, ou linhas de igual pressão. A Corrente Circumpolar Antártica (Antartic Circumpolar Current, ACC) é uma corrente marítima com 24.000 km, dirigida por ventos de oeste, que transporta de 120 a 157 Sv. A formação NADW (North Atlantic Deep Water) é impulsionada principalmente pelas mudanças de densidade causadas por arrefecimento invernal de águas de superfície de alta salinidade.

⁶⁷ Disponível em: https://www.windows2universe.org/earth/Water/images/surface_currents_lg.jpg_image.html. Acesso em 29/02/2016.

⁶⁸ A pseudo força inercial de Coriolis é aquela percebida por um observador fixado à superfície terrestre, em relação a um corpo na atmosfera - como um projétil ou o próprio ar - em função da rotação planetária.

Em contraste com o MOC (Meridional Overturning Circulation), que se refere à circulação de massa, o THC (Thermohaline Circulation) descreve circulação oceânica no contexto das propriedades físicas de temperatura e salinidade. "O termo THC é comum na literatura paleoceanográfica porque alguns métodos (proxy) são indicadores de temperatura do oceano e da salinidade e não estritamente fluidez" (CRONIN, 2010, p.7).

Uma circulação oceânica turbulenta, mais dinâmica, variando em menores escalas espaciais e temporais, regida pelos ventos, marés e topografia do fundo, é necessária para explicar mais detalhadamente os padrões globais de circulação.

Divergências e fortes zonas de ressurgência ao longo das margens costeiras (ver Figura 14), como as do Peru e do Equador⁶⁹, resultam em altíssima produtividade biológica. "As áreas estão entre as regiões biologicamente mais produtivas do mundo, onde os registros paleoceanográficos podem ser resgatados" (CRONIN, 2010, p.6).

Figura 14 - As forças que afetam as zonas de ressurgência costal⁷⁰

A causa e a quantidade de formação de nuvens ainda são pouco compreendidas pela Meteorologia, e a única certeza é que o campo magnético terrestre afeta a nebulosidade. A Terra tem um raio médio de 6.371 km, com um manto interno constituído de rochas, e um núcleo externo de ferro metálico com velocidades de deslocamento semelhantes às das águas oceânicas superficiais. Esse deslocamento do núcleo gera o campo magnético.

⁶⁹ Como na zona de ressurgência em nosso Cabo Frio - RJ.

⁷⁰ <https://www.nwfsc.noaa.gov/research/divisions/fe/estuarine/oeip/db-coastal-upwelling-index.cfm>.

Quando o campo magnético da Terra é muito forte, os raios cósmicos e os plasmas solares proveniente do espaço sideral não conseguem penetrar na atmosfera. Os raios cósmicos são radiações de alta energia que cruzam o espaço cósmico e incidem sobre a Terra. Se houver um enfraquecimento do campo magnético, haverá incidência de muitos raios cósmicos e, com isso, a nebulosidade será maior, porque os raios cósmicos desempenham o papel de núcleo de condensação⁷¹ (ver Figura 15) de um sólido em suspensão na atmosfera ou a de um corpúsculo líquido (aerossol) formado pelo vapor d'água condensado em gotícula, que dará origem à nuvem (MARUYAMA, 2009)⁷².

Figura 15 - Condensação de água em torno de partículas ou aerossóis⁷³

Os raios cósmicos favorecem a aglutinação⁷⁴ das moléculas de água.

São causas da mudança climática, segundo Cronin (2010, p.17):

- Forçantes externas, visão climatológica - concentração de gases do efeito estufa, alterações na radiação solar, emissões vulcânicas e aerossóis de sulfato.
- Forçantes externas, visão paleoclimatológica - incluem aqueles decorrentes de processos extraterrestres tais como efeitos gravitacionais do sistema solar sobre a órbita da Terra, poeira extraterrestre e impactos de meteoros.

⁷¹ Núcleo de condensação é a parte da nuvem em que o vapor de água condensa-se. Eles podem ser formados de poeira, gotículas de água, partículas de gelo, aerossóis, partículas de sais e de ácidos que são encontradas na atmosfera, partículas produzidas de emissões biogênicas de enxofre, produtos de queima de vegetação, poluentes da queima de materiais fósseis.

⁷² Sumário do conteúdo das páginas 43-45 da referida fonte.

⁷³ Response of cloud condensation nuclei (>50 nm) to changes in ion-nucleation", H. Svensmark, Martin B. Enghoff, Jens Olaf Pepke Pedersen, Physics Letters A 377 (2013) 2343-2347.

⁷⁴ Ilustração em <http://www.briangwilliams.us/geology/clouds-and-precipitation.html>.

- Processos internos, visão climatológica - interações dinâmicas entre atmosfera e oceanos, como o El Niño, e os seis eventos Heinrich⁷⁵.

- Processos internos, visão paleoclimatológica - incluem diastrofismo⁷⁶ (orogênese, espalhamento basáltico, formação de cordilheira basáltica), vulcanismo (saída de gases), e mudanças biológicas longo prazo (ou seja, evolução de plantas terrestres).

Os feedbacks, segundo Cronin (2010, p.18), são processos que respondem a uma força externa, amplificando (positivo) ou amortecendo (negativo) a forçante inicial, sendo agrupados em três categorias informais - rápidos, lentos e muito lentos.

- Feedbacks rápidos - nuvens e vapor de água (efeito de estufa e de albedo positivo); o gelo do mar (maior albedo, proíbe atividades fotossintéticas no oceano).

- Feedbacks lentos - vegetação superficial terrestre (albedo, hidrologia); temperatura superficial marinha e circulação oceânica (reduz transporte de calor do equador-a-pólo); ciclo de carbono (concentrações de gases do efeito estufa); dinâmica do manto de gelo (albedo, erosão, circulação atmosférica); aerossóis de poeira. Há evidência substancial, a partir de material trazido pelo vento em sedimentos marinhos e depósitos de loess⁷⁷ continentais, que a atmosfera durante os períodos glaciais foi mais empoeirada, embora não necessariamente houvessem ventos em demasia, do que durante períodos interglaciais (REA, 1994⁷⁸; HESSE e McTAINSH, 1999⁷⁹).

- Feedbacks muito mais lentos - Processos geológicos, rochas carbonáticas e sedimentos orgânicos ricos durante a atividade vulcânica.

Segundo Cronin (2010, p.20-23), são desafios na paleoclimatologia moderna:

- Sensibilidade climática, ao CO₂ e outros gases, CH₄, óxido nitroso N₂O;
- Clima polar, resposta mais rápida e maior do que em clima tropical;

⁷⁵ Eventos Heinrich são episódios ocorridos durante a última glaciação, há entre 110 e 12 mil anos, constatados por sedimentos transportados por icebergs e depositados nos fundos oceânicos.

⁷⁶ Diastrofismo é qualquer dos movimentos da crosta terrestre produzidos por processos tectônicos, incluindo a formação de bacias oceânicas, continentes, platôs e cadeias de montanhas.

⁷⁷ Depósito eólico distal, pouco ou não estratificado, de frações finas que sofreram deflação e foram acumuladas marginalmente a regiões desérticas, em regiões de menor energia eólica, propiciando a formação de terrenos de alta fertilidade, a base de quartzo, feldspato e calcita comuns, e outros minerais que não sofreram intemperismo químico significativo nas condições desérticas. Os depósitos de loess originam um solo muito rico, cheio de nutrientes, mas também muito frágil e suscetível à erosão.

⁷⁸ The mineral component of pelagic sediment is brought to the deep sea by transport in the wind. Extraction and analysis of this dust allows estimation of the past aridity of the eolian source region, via flux determinations, and of the intensity of the transporting winds, from grain size data.

⁷⁹ Dust transported by Southern Hemisphere mid-latitude westerly winds from Australia and deposited in the Tasman Sea shows no evidence for stronger winds during the last glacial maximum (LGM), compared to the Holocene. Features of the particle-size distributions of the dust do, however, indicate enhanced dry deposition of dust in the LGM changing to rainfall scavenging during deglaciation.

- O sol na variabilidade climática, forçante decenal na escala de tempo milenar;
- Ciclo do carbono e clima, a "fertilização com CO₂" liberou na atmosfera cerca de 156 x 10⁹ t de Carbono (1850-2000);
- Mudanças climáticas abruptas, clima regional apenas ao longo de décadas;
- Detecção de alguma impressão digital humana.

"Nossa perspectiva? Ainda não estamos seguros do quanto e do como os fatores externos influenciam a variabilidade interna, sob diferentes estados climáticos medianos" (CRONIN, 2010, p.24). Dentre as perspectivas de Van Andel (1995, p.102), "os padrões glacial e interglacial seriam engatilhados por alterações na órbita terrestre, modificados pelas interações com os oceanos e a atmosfera". No curto prazo, hoje, depois de 100 anos queimando combustíveis fósseis, observamos um aumento de 0,5°C no século XX. Temos visto aumentos de mesma ordem de grandeza entre séculos de épocas não industriais, e que "poderiam ser considerados tanto como aumento do efeito estufa quanto como uma flutuação natural" que marcaria o final do resfriamento iniciado no início do século XIX⁸⁰ (MEDIIVILLA, 2004, p.378). Também se deve levar em conta a possibilidade de parte desse aquecimento corresponder a alterações na intensidade solar.

⁸⁰ Chamado mínimo de Dalton.

3.2 – Clima no Pré-Cambriano.

O termo pré-cambriano remete-nos aos 90% do tempo inicial da história do planeta (ver Tabela 4).

Tabela 4 - As divisões do tempo geológico⁸¹

	Éon	Era	Ma
Pré-Cambriano	Hadeano	Críptico	4.560
		Grupos Basin	4.250
		Nectárico	4.120
		Ímbrico	4.050
	Arcaico	Eoarqueano	4.000
		Paleoarqueano	3.600
		Mesoarqueano	3.200
		Neoarqueano	2.800
	Proterozoico	Paleoproterozoico	2.500
		Mesoproterozoico	1.600
		Neoproterozoico	1.000
Fanerozoico		Paleozoico	541
		Mesozoico	252
		Cenozoico	66

Fonte: elaboração própria do autor.

Carl Sagan (1997⁸²) propôs que, em comparação aos dias de hoje, há cerca de 4 Ga, a radiação solar foi 30% menor. A baixa energia solar durante o pré-cambriano deveria ter conduzido o planeta a uma situação de glaciação, a menos que o albedo fosse perto de zero ou que outros fatores tenham influenciado a temperatura média planetária. Evidências sedimentológicas, geoquímicas e paleobiológicas, no entanto, indicam que a Terra suportou água líquida, onde os organismos evoluíram, há cerca de 3,5 Ga (KNOLL 2003⁸³, CATLIN 2006⁸⁴). Isótopos de oxigênio sugerem que a Terra pode ter experimentado ambientes hipotermiais, com temperaturas para o éon Arqueano da ordem de 55-85°C. A literatura refere-se a esta situação como o Paradoxo do Sol Fraco (*Faint Sun Paradox*).

⁸¹ Em Escala Cronoestratigráfica Internacional 2016 (OGG, 2016, p.3).

⁸² Atmospheric mixing ratios of approximately 10(-5±1) for ammonia on the early Earth would have been sufficient, through the resulting greenhouse warming, to counteract the temperature effects of the faint early sun. Here it is shown that ultraviolet absorption by steady-state amounts of high-altitude organic solids produced from methane photolysis may have shielded ammonia sufficiently that ammonia resupply rates were able to maintain surface temperatures above freezing.

⁸³ Explores the deep history of life from its origins on a young planet to the incredible Cambrian explosion, presenting a compelling new explanation for the emergence of biological novelty.

⁸⁴ The earliest sedimentary rocks that can tell us about life come from the Isua Supracrustal Belt in Greenland. Papineau & Mojzsis (in this issue) investigate sulfur isotopes from >3.77 Ga Isua rocks.

Um Sol fraco não permitiria que a água se mantivesse em estado líquido (ela congelaria), e não sustentaria vida em nosso planeta. A não ser que o fluxo de calor proveniente do interior da Terra fosse muito maior do que o atual.

Isótopos de oxigênio de carbonatos antigos têm sido utilizados para reconstruir temperaturas do Arqueano. A razão isotópica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (denotada por $\delta^{18}\text{O}$) é um valioso proxy paleoclimático. A temperatura é um controle dominante sobre a proporção de isótopos pesados e leves de oxigênio, mas outros fatores, como o pH da água do mar e hidrologia (composição isotópica da água de nascente), o volume de gelo continental e processos diagenéticos complicam a simples interpretação do $\delta^{18}\text{O}$ como um proxy de temperatura. "Há quem sustente que esta razão isotópica reflete os mares rasos do Arqueano, em função do fluxo de calor do interior da Terra" (CRONIN, 2010, p.59).

"Seja qual for a história da temperatura exata do éon Arqueano, uma hipótese sobre como manter o planeta aquecido o suficiente para suportar a água e a vida com um sol mais fraco sustenta que gases do efeito estufa (CO_2 e CH_4 atmosféricos) foram bastante mais elevados do que os das últimas centenas de milhões de anos. Algumas estimativas de concentrações pré-cambrianas de CO_2 são de 100 a 1000 vezes maiores do que as atuais (3,8-38% do volume de gás do atmosfera). As fontes do CO_2 do Arqueano também são incertas. Os gases do efeito estufa foram um fator provável na prevenção de que a jovem Terra se mantivesse num estado glacial e permitindo que os organismos aquáticos evoluíssem" (CRONIN, 2010, p.59). Quanto à evolução desses organismos aquáticos, Peter Ward (2015, p.66)⁸⁵ informa que na região North Pole Dome, no oeste da Austrália, e numa área na África do Sul, chamada Barberton Greenstone Belt, perto do famoso Parque Nacional Paul Kruger - ambas mostram a presença das mais antigas formas de estromatólitos.

Estromatólitos (colônias de cianobactérias), como os que hoje vemos na Austrália? Não, podem não ser as mesmas estruturas (ver Figura 16). Donald Lowe (1994⁸⁶) avaliou os ditos estromatólitos com 3,2 Ga, e concluiu que eram abiogênicos⁸⁷. Não foram encontradas bactérias fósseis, mas mostravam características mais consistentes com uma origem não

⁸⁵ The emphasis on catastrophes is the first of a triad of novelties on which this book is based. The second involves an enhanced role for some common but insufficiently appreciated inorganic molecules, notably carbon dioxide, oxygen and hydrogen sulfide.

⁸⁶ The three well-documented occurrences of three-dimensional stromatolites older than 3.2 Ga meet most criteria for biogenicity except the presence of fossil bacteria. However, they also show features more consistent with nonbiological origins. The paucity of Archean stromatolites older than 3.2 Ga probably reflects the paucity of known and possibly extant carbonate deposits of this age.

⁸⁷ Não seriam originados geneticamente.

biológica. Eram depósitos carbonáticos sobreviventes, e puderam ser reproduzidos em laboratório, gota a gota. Nas palavras de Van Andel⁸⁸ (1995, p.302): "Nós não podemos provar que os estromatólitos antigos possuíam origem biológica, pois não encontramos qualquer cianobactéria fóssil neles."

Figura 16 - Estromatólitos antigos e modernos

Estromatólitos antigos (à esquerda) puderam ser reproduzidos em laboratório, por deposição mineral, enquanto os modernos (à direita) possuem origem biológica.⁸⁹

A mais nova e mais firme indicação da presença de oxigênio abundante na atmosfera vem da presença de um vasto depósito do manganês mineral, conhecida como o campo de manganês Kalahari na África do Sul, datado de 2,22 Ga. Não há nenhum vestígio de pirita detríticas, uranita, ou estranhos isótopos de enxofre. Ele só poderia ter se formado em uma atmosfera rica em oxigênio e, portanto, isso nos dá a "data mais antiga em que temos a certeza de que o mundo de cianobactérias, o escudo de ozônio e oxigênio, existiram no mar e no ar" (WARD, 2015, p.81).

O registro fóssil pré-Ediacarano fornece poucas pistas, mas a diversidade de microfósseis no mar conhecidos como acritarcos⁹⁰ (organismos planctônicos de tamanho

⁸⁸ Questions have been raised more often than answered, because questions rather than answers drive knowledge forward, and I have not shied away from controversy, because controversy rejuvenates us. A truly unhappy experience was the amount of bad, unripe, or irresponsible science I encountered on my way.

⁸⁹ Fontes: <http://www.fossilmall.com/Science/stromatolite-fossils/cochabamba/stromatolites-78.htm>, Cochabamba, Bolívia e <http://go2add.com/paleo/TheEarliestLife.php>, Shark Bay, Australia

pequeno, mas definitivamente eucariontes⁹¹) aumentava e diminuía drasticamente (ver Figura 17).

Figura 17 - Distribuição dos acritarcos nos ambientes plataformais.⁹²

A figura mostra a relação de dominância e diversidade dos acritarcos.

Temos evidências para um evento da oxidação massiva há 2,1 Ga, pela formação de um dos maiores depósitos do mundo de hematita pura (Fe_2O_3) - a mina de Sishen na África do Sul. Um tipo inteiramente novo de corpo intracelular veio à existência, e ainda existe: a organela chamada mitocôndria, a principal fonte de energia das células eucarióticas, que são células maiores do que os seus antepassados procariotas (bactérias) (WARD, 2015)⁹³.

⁹⁰ Os acritarcos são pequenas estruturas orgânicas encontradas como fósseis. Em geral, qualquer pequena estrutura orgânica (nem carbonática, nem silicática) não solúvel em ácido, que não pode ser classificada de outra maneira, é um acritarco. A maioria dos acritarcos são provavelmente restos de organismos unicelulares, especialmente de algas plânctônicas. São encontrados em rochas sedimentares do precambriano ao presente.

⁹¹ Eucariontes são seres com múltiplas células individualizadas por membranas.

⁹² Fonte: (conforme Cristina Félix e Paulo Alves de Souza, UFRGS)

https://www.researchgate.net/publication/269649953_Acritarcos_Grupo_Acritarcha_Evitt_1963_conceitos_gerais_aplicacoes_e_importancia_na_analise_estratigrafica_do_intervalo_Pennsylvaniano_e_Permiano_da_Bacia_do_Parana.

⁹³ Sumário do conteúdo das páginas 85-88 da referida fonte.

A energia solar durante a era Neoproterozoica (1 Ga a 544 Ma) ainda era cerca de ao menos 6% inferior à de hoje. "Ao período geológico entre ~ 850 e 630 Ma foi dado o nome formal de Criogeniano em virtude do predominante clima frio global - foi a chamada Terra Bola de Neve" (Snowball Earth) (CRONIN, 2010, p.60).

Evidências das glaciações do Neoproterozoico são conhecidas a partir de uma variedade de depósitos glaciais em todos os continentes modernos, exceto na Antártida. Em função da formação de carbonatos, muitos cientistas acreditam numa grande mudança no ambiente de deposição, embora alguns acreditem que possam representar transgressões marinhas localizadas. Os registros geoquímicos indicam uma depleção isotópica de carbono durante os ciclos glaciais Kaigas, Sturtian, Marinoan e Gaskiers - eventos que duraram de um a dezenas de milhões de anos. Mares congelados levaram à estagnação do oceano em grande escala, levando à depleção de oxigênio oceânico, explicando a deposição de ferro abundante no sedimento Neoproterozoico.

Não há um acordo universal sobre o gatilho ou feedbacks dominantes, e o que se aplica a um ciclo glacial pode não se aplicar a outros. Ou seja, cada ciclo glacial pode ter sua evolução (deflagração, manutenção e término) comandada por causas completamente diversas das de outros ciclos glaciais.

Vários fatores causais são apontados para a compreensão do clima glacial e deglacial do Neoproterozoico. Segundo Cronin (2010)⁹⁴, os fatores mais importantes seriam a redução do influxo solar, CO₂ atmosférico e metano, paleogeografia (rompimento de Rodínia, ver Figura 18), atividade tectônica (orogenia, desgaseificação vulcânica) e obliquidade orbital (inclinação do eixo da Terra). Mecanismos de feedback incluem intemperismo de silicato, albedo de gelo, sepultamento de carbono, e circulação oceânica. Quanto à existência de Rodínia, não existe qualquer comprovação, apenas especulação.

⁹⁴ Sumário do conteúdo das páginas 61-64 da referida fonte.

Figura 18 - Reconstrução proposta de Rodínia para 750 Ma.⁹⁵

Cinturões orogênicos (1.1 Ga) ressaltados em verde. Pontos vermelhos indicam granitos tipo-A (~1.4 Ga).

"Descobrimos que antes e durante a glaciação Gaskiers (582-580 Ma), as águas de oceano profundo⁹⁶ nesta parte do mundo⁹⁷ eram anóxicas⁹⁸ e ferruginosas" (CANFIELD, 2014, p.128). Diferentes indicadores geoquímicos⁹⁹ podem dar respostas um pouco diferentes, mas "um aumento da oxigenação do oceano parece evidente no final da Era Neoproterozoica, começando talvez tão cedo quanto há 630 Ma e que se expressa em indicadores locais de oxigenação por volta de 580 Ma" (id., p.129). "Isto sugere que quando os animais¹⁰⁰ surgiram, os processos aeróbicos marinhos não eram tão generalizados como hoje" (id., p.131).

⁹⁵ Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rodinia> Acesso em 29/02/2016.

⁹⁶ No contexto geológico, "oceano profundo" significa qualquer coisa abaixo da base das ondas de tempestades, ou abaixo de cerca de 100 metros de profundidade.

⁹⁷ Canfield refere-se à Península Avalon, Terra Nova, Canadá.

⁹⁸ Pobres em oxigênio.

⁹⁹ Composição isotópica de Molibdênio.

¹⁰⁰ Fauna Ediacarana.

Figura 19 - Fauna Ediacarana, *Spriggina floundersi*, anelídeo primitivo¹⁰¹
(provável antecessor dos trilobitas)

Não existe uma continuidade entre a fauna ediacarana (ver Figura 19) e os reinos surgidos no Fanerozoico. Até mesmo qualificar um ser ediacarano como anelídeo, ou como animal, já é um exagero. A vida como conhecemos hoje, é bruscamente inaugurada no Cambriano (ver Gráfico 2). E ela é inaugurada, em todo o planeta, sob as águas oceânicas. As águas cobriam todos os continentes, e a vida, tal como conhecemos hoje, foi disseminada.

¹⁰¹ Imagem disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Spriggina> Acesso em 29/02/2016.

Gráfico 2 - A explosão da vida no cambriano¹⁰²

A explosão da vida no cambriano foi marcada por um par de eventos oscilatórios no eixo terrestre.

Quando dados paleomagnéticos e geoquímicos de diversas partes do globo mostram o mesmo deslocamento, ao mesmo tempo, nós aprendemos alguma coisa com o modo como a Terra trabalha. Um par de rápidos deslocamentos oscilatórios de $\sim 60^\circ$ no eixo de rotação da Terra foi observado por Adam Maloof (2006). Esse tipo de movimento é chamado de evento TPW (True Polar Wander) e envolve geologicamente todo o planeta. Acreditamos que cerca de 30 destes eventos TPW (KIRSCHVINK, 1997; MITCHELL, 2014) ocorreram nos últimos 3 bilhões de anos, muitos dos quais coincidem com interessantes eventos, como a explosão de vida do Cambriano, inaugurando o Fanerozoico. Seriam estes impactos um registro da chegada de um grande volume de água à Terra? Águas cruzam o sistema solar em cometas.

¹⁰² Copyright Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

3.3 – Clima no Fanerozoico.

Fanerozoico significa "vida visível." É o éon da vida tal como conhecida hoje (Tabela 5).

Tabela 5 - As divisões do tempo Fanerozoico¹⁰³

	Era	Período	Ma
éon Fanerozoico	Paleozoico	Cambriano	541,00
		Ordoviciano	485,40
		Siluriano	443,80
		Devoniano	419,20
		Carbonífero	358,90
		Permiano	298,90
	Mesozoico	Triássico	251,90
		Jurássico	201,40
		Cretáceo	145,00
	Cenozoico	Paleogeno	66,00
		Neogeno	23,03
		Quaternário	2,58

"Em 2006, Mark Roth descobriu que doses subletais de H₂S (sulfeto de hidrogênio) deixavam um mamífero num estado que somente podia ser descrito como em animação suspensa¹⁰⁴. A animação, ou movimento, parava não apenas nos aspectos observáveis do animal. A respiração e o batimento cardíaco tornavam-se extremamente lentos, as funções celulares desempenhavam-se numa taxa muito reduzida. E mais: os animais perdiam sua capacidade de termorregulação. Eles paravam de ser endotérmicos, ou sangue quente, e revertiam a um estado primitivo dos cordados: ectotérmico, ou sangue frio. Mas era uma morte temporária, a vida suspensa por um tempo finito. Quando a aplicação do gás cessava, as funções normais retornavam. A morte química, quando corretamente combinada e energizada, podia voltar à vida. Pode ser que a vida na Terra tenha vindo de um lugar que nós chamamos morte" (WARD, 2015)¹⁰⁵. Quanto desse mecanismo de vida suspensa ultrapassou a barreira das extinções?

Interessante observar que todos os filos animais atuais (cerca de 32) apareceram pela 1ª vez na explosão cambriana. "Surpreendentemente, não houve um único filo animal

¹⁰³ Tabela com Escala Cronoestratigráfica Internacional 2016 (OGG, 2016, p.3); elaboração pelo autor.

¹⁰⁴ Ver www.ted.com-talks-mark_roth_suspended_animation.

¹⁰⁵ Sumário do conteúdo das páginas 28-31 da referida fonte.

adicionado ao mundo, mesmo após a devastadora extinção do Permiano de 252 Ma" (WARD, 2015, p.135).

Paleogeografia do Fanerozoico

"Descrições de reconstruções paleogeográficas do Fanerozoico podem ser encontrados em www.scotese.com/ (para referências) e em Veevers" (2004¹⁰⁶, apud CRONIN, 2010, p.65). Entretanto, "amostragens feitas na Austrália por Kirschvink indicam 70° de rotação (no sentido horário) entre o Cambriano Inferior e o Cambriano Tardio, em 10 milhões de anos, ou muito menos tempo que isso" (WARD, 2015, p.142). Como a Austrália era parte do chamado Gondwana¹⁰⁷, isto implicaria numa movimentação de metade da massa continental de então. Similarmente, são encontradas comprovações paleomagnéticas de um movimento giratório (no sentido inverso ao do relógio) em Laurentia¹⁰⁸ simultaneamente ao movimento do Gondwana.

A tectônica de placas sugere, atualmente, uma movimentação de 3 cm/ano para a separação entre África e América do Sul. As velocidades são variadas. Para o Oceano Pacífico, existem sugestões de movimentações em torno de 10 cm/ano. Para as movimentações do Cambriano, estamos falando de diversos metros ao ano. Ou seja, a causa não pode ter sido apenas tectônica, a causa deve ter sido outra. Seria esse um indício da chegada de um grande volume de água à Terra, em cometa(s)?

No Cambriano, tudo estava acontecendo ao mesmo tempo. Um grande impulso na evolução, tanto em número de espécies quanto na planificação de corpos, um enorme aumento na biomineralização (e esqueletos), o estabelecimento de níveis tróficos, enormes oscilações nos depósitos de carbono orgânico, e oscilações bruscas nas posições dos continentes. Cabe ponderar se isto foi coincidência ou existem relações de causa e efeito.

"Os uniformitaristas¹⁰⁹ falam em movimentos crustais atuais da ordem de uma polegada por ano, ou dez polegadas ao ano (teorético e controverso). Mas no Cambriano

¹⁰⁶ The integration of molecular phylogenetics with fossil and life history data as presented in this paper provides insights into the evolutionary history of reduviids and clears the way for in-depth evolutionary hypothesis testing in one of the most speciose clades of predators.

¹⁰⁷ Além da Austrália, também incluía Antártida, Índia, África e América do Sul.

¹⁰⁸ Laurentia seria o supercontinente que envolveria América do Norte e Europa.

¹⁰⁹ O uniformitarismo é o princípio científico proposto pelo médico James Hutton (1726-1797), considerado um dos pais da geologia moderna. A teoria uniformitarista baseia-se na reprodução uniforme dos dados observáveis em fenômenos geológicos atuais, para a interpretação da ocorrência destes fenômenos no passado. Seus defensores buscavam afastar-se das catástrofes anunciadas nas religiões.

comprovamos movimentos de metros por ano. Dados reprodutíveis e gritantes. Isso seria impossível se apenas placas tectônicas estivessem envolvidas" (WARD, 2015, p.142). "A força da gravidade parece constituir um freio a movimentos tectônicos de grande amplitude, ou vulcanismos desmedidos" (PEREIRA¹¹⁰, 1980, p.77).

Uma bola girando muda seu eixo de rotação se um novo estranho peso for adicionado à mesma. [...] Uma rápida alteração de massa no planeta pode ocorrer de diversas formas, incluindo o impacto de um grande asteróide ou cometa, ou mesmo internamente através de da erupção de magma do interior da Terra para sua superfície (WARD, 2015, p.144).

A chegada de um ou mais cometas (água!) alteraria a massa do planeta, mudaria sua inclinação, criaria oceanos profundos, permitiria a explosão da vida. Poderia, inclusive, ter trazido parte desta vida, em animação suspensa. Além disso, a cobertura de água propiciada por cometas aceleraria o arrefecimento do planeta, e a eventual amônia vinda com esse(s) cometa(s) iria formar uma atmosfera rica em nitrogênio. Uma atmosfera quase somente de nitrogênio, até que a fotossíntese adicionasse um grande volume de oxigênio à mesma.

Isotopia no Fanerozoico

"A curva de análise de isótopos de oxigênio (^{18}O) no Fanerozoico tem por principal característica um crescimento constante de um valor médio de -8‰ no Cambriano (~543-450 Ma) para 0‰ no Quaternário. Sobrepondo-se a esta tendência estão as oscilações de milhões de anos relacionadas com grandes glaciações no final dos períodos Ordoviciano (~445 Ma, curta) e Carbonífero (~300 Ma, mais extensa) e da era Cenozoica. Valores empobrecidos do ^{18}O no Paleozoico implicam em temperaturas oceânicas elevadas" (VEIZER, 1999¹¹¹, apud CRONIN, 2010, p.64). (ver Gráfico 3).

¹¹⁰ A pluralidade de planetas dotados de biosferas e de evoluções independentes de floras e faunas que desconhecemos completamente: eis a nova realidade que Harlow Shapley (1885-1972) proclamou na década de 1950, com o mesmo desassombro de Darwin no século anterior, relativamente à origem das espécies.

¹¹¹ A total of 2128 calcitic and phosphatic shells, mainly brachiopods with some conodonts and belemnites, were measured for their ^{18}O , ^{13}C and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values. The dataset covers the Cambrian to Cretaceous time interval. Paleogeographically, the samples are mostly from paleotropical domains.

Gráfico 3 - Estimativa da composição isotópica da água do mar do Fanerozoico

As curvas das referências 4 e 28 representam o modelo prévio estimado; a linha tracejada indica o $\delta^{18}\text{O}$ do oceano atual. Os losangos pretos representam as novas estimativas para o Pensilvaniano e Siluriano.¹¹²

"O ^{87}Sr é o estrôncio radiogênico gerado pelo decaimento do rubídio ^{87}Rb e deriva do desgaste e da desagregação de rochas continentais sob ação dos agentes atmosféricos" (HALLAM, 1992, p.170). A razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de água do mar tem flutuado entre os valores médios de erosão terrestre e trocas hidrotermais com basaltos de cadeias meso-oceânicas. A composição isotópica em qualquer período no passado é reflexo do carbonato marinho inalterado daquele período. Dados referenciais de alta precisão existem para períodos específicos do registro geológico com uma correspondente melhora na resolução temporal (CAPO, 1998). As observações apresentadas por Hallam e por Capo, nos indicam que a crosta continental não submersa era bem menor no Paleozoico do que no Mesozoico (ver Gráfico 4). Isso não comprova que houvesse menos crosta continental (silicática), mas que esta, se existisse, estaria submersa.

A relação entre isótopos pesados (^{87}Sr) e leves (^{86}Sr) de estrôncio na água do mar é controlada pela entrada de fontes continentais através de erosão química, transporte por rios, e pela entrada de alteração química de crosta oceânica nas cristas oceânicas e zonas tectônicas.

¹¹² Fonte: Coupling of surface temperature and atmospheric CO₂ concentrations during the Palaeozoic era; Article in Nature 449(7159):198-201 • October 2007; Rosemarie Came, John M Eiler, Jan Veizer, Christopher R Weidman.

Nos últimos 2,5 Ma a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na água do mar cresceu 14×10^{-5} indicando que a erosão continental foi extremamente alta (CAPO e DePAOLO, 1990)¹¹³. Sim, é impossível discutir o clima no Fanerozoico sem discutir, ao menos, a dimensão e o posicionamento dos continentes e oceanos.

Gráfico 4 - Gráfico de variação do $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ oceânico através do Fanerozoico.¹¹⁴

Paleomagnetismo

A totalidade do assoalho oceânico basáltico existente foi formada no Mesozoico. "O GPTS (Geomagnetic Polarity Time Scale) tornou-se uma ferramenta central na construção de escalas de tempo geológico Cretáceo-Cenozoicas e facilita a correlação entre outras medidas de tempo geológico, como a estratigrafia isotópica e a bioestratigrafia" (McELHINNY,

¹¹³ Measurements of marine carbonate samples indicate that during the past 2.5 million years the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of seawater has increased by 14×10^{-5} . The high average rate of increase of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ indicates that continental weathering rates were exceptionally high. Nonuniformity in the rate of increase suggests that weathering rates fluctuated by as much as $\pm 30\%$ of present-day values. Some of the observed shifts in weathering rates are contemporaneous with climatic changes inferred from records of oxygen isotopes and carbonate preservation in deep sea sediments.

¹¹⁴ Em 29/2/2016. Fonte: Burke, W.H.; Denilson, R.E., Hetherington, E.A., Koepnick, R.B., Nelson, H.F. & Otto, J.B. 1982. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time. *Geology* 10, 516-519. Disponível em <http://www.le.ac.uk/gl/art/gl209/lecture2/lect2-6.html>.

2000¹¹⁵, p.138). Estender o GPTS para além de 175 Ma é atualmente difícil, porque "não há nenhum fundo do oceano existente que permita a construção de uma sequência de referência completa de inversões de polaridade" (id., p.159).

Por muito tempo se pensou que a reversão paleomagnética na fronteira entre as épocas Brunhes e Matuyama teria ocorrido há 730 ka (setecentos e trinta mil anos), mas com base no ajuste em isótopos de oxigênio de mar profundo e registros paleomagnéticos para novas soluções astronômicas de insolação, "Nicholas Shackleton (1990¹¹⁶) propôs que este evento teria ocorrido há 780/790 ka. Tal data foi confirmada por testes radiométricos" (CRONIN, 2010, p.119). Conforme mudamos o presente, mudamos o passado, inclusive na geocronologia.

Gás carbônico – CO₂

Até 800 mil anos passados, a medida direta de CO₂ é possível a partir do ar preso no gelo da Antártica. Métodos proxy primários são utilizados para reconstruir anteriores concentrações de CO₂ (ver Gráfico 5): isótopos de carbono pedogênicos (*¹³C de carbonatos pedogênicos, CaCO₃ derivado de CO₂); estômatos foliculares (CO₂ mais elevado, menor área de poro estomático); biomarcadores de algas (alkenones, relacionamento geoquímico orgânico complexo); isótopos de boro (*¹¹B, relacionados com pH do oceano e alcalinidade) (CRONIN, 2010)¹¹⁷.

¹¹⁵ An up-to-date synthesis/ analysis of global paleomagnetic data for the major crustal blocks over a billion years.

¹¹⁶ The Ocean Drilling Program (ODP) provided excellent material for high resolution stable isotope analysis of both benthonic and planktonic foraminifera through the entire Pleistocene and upper Pliocene.

¹¹⁷ Sumário do conteúdo das páginas 67-69 da referida fonte.

Gráfico 5 - Gráfico do RCO₂ e % O₂ atmosférico no éon Fanerozoico.¹¹⁸

Tabela 6 - Comparativo de massas de carbono nos ciclos de curto e longo prazos

Massas de carbono envolvidas nos ciclos de curto (pré-humano) e longo prazos, comparado com alguns fluxos no ciclo de longo prazo.		
Substância ou fluxo	Massa (10 ¹⁸ mol)	Fluxo (10 ¹⁸ mol/my)
C carbonatos nas rochas	5.000,0000	
C orgânico nas rochas	1.250,0000	
C inorgânico dissolvido nos oceanos	2,8000	
C no solo (incluindo caliche)	0,3000	
CO ₂ atmosférico	0,0600	
Biosfera terrestre	0,0500	
Biosfera marinha	0,0005	
C orgânico enterrado em sedimentos		5
CO ₂ absorvido por Ca e por Mg (intemperismo de silicatos)		7
CO ₂ liberado por gases vulcânicos		3-9

Fonte: elaboração própria do autor.¹¹⁹

No ciclo do carbono (curto), ocorre fixação pela fotossíntese e liberação pela respiração e decomposição (ver Tabela 6). "No ciclo geológico (longo) o carbono é fixado em

¹¹⁸ Fonte: Artigo "O ciclo do carbono a longo prazo, os combustíveis fósseis e da composição atmosférica", Robert A. Berner. Nature 426, 323-326 (20/Nov/2003).

¹¹⁹ Adaptado de Berner (2004, p.6)

carbonato de cálcio de moluscos, sedimenta e sofre subducção¹²⁰, para ser liberado através de erupções vulcânicas" (BERNER, 2004, p.5). "Por que os vulcões sofrem erupções episódicas, em vez de continuamente, enquanto a subducção em si seria contínua?" (VAN ANDEL, 1995, p.155). Como se comprova a existência de "subducção"?

A dissolução dominante no intemperismo de silicatos é a do Ca contido no plagioclásio, Mg em minerais ferromagnesianos como piroxênios, anfibólios, e biotita, e ambos Ca e Mg no vidro vulcânico. Estudos de campo sobre a taxa de desgaste em tipos de rocha relativamente uniforme, sujeitos a climas e relevo semelhantes, têm mostrado que basaltos intemperizam mais rápido do que granitos ou outras rochas ígneas ácidas e metamórficas (ver Tabela 7). Principalmente por causa da presença de "plagioclásio altamente cálcico, piroxênios e vidro vulcânico em basaltos, que se dissolvem mais rapidamente do que os minerais intemperizáveis característicos de granitos e gnaisses, plagioclásio sódico / cálcico, feldspatos potássicos, e micas" (GOLDICH, 1938¹²¹, apud BERNER, 2004, p.36-37).

Tabela 7 - Comparativo entre as séries de intemperismo e de cristalização magmática¹²²

Série de estabilidade de Goldich frente ao intemperismo	Velocidade de Intemperismo	Série de resfriamento e de cristalização magmática de Bowen		
Mais estável	MENOR	Último a cristalizar (e a meteorizar)		
Óxidos de Ferro (hematita)	MENOR			
Hidróxidos de Alumínio (gibbsite)	menor		Minerais Máficos	Plagioclásios
Quartzo	menor	Quartzo		
Argilominerais	men			
Muskovita	...	Muskovita		
Feldspato potássico (Ortoclásio)	.	Ortoclásio		
Biotita			Biotita	
Feldspato sódico (Albita)			^	Albita
Anfibólios	.	Anfibólio	^	^
Piroxênios	...	Piroxênio	^	^
Feldspato cálcico (Anortita)	mai		^	Anortita
Olivina	maior		Olivina	
Calcita	maior		(cristalização descontinua)	(cristalização contínua)
Halita	MAIOR			
Menos estável	MAIOR	Primeiro a cristalizar (e a meteorizar)		

¹²⁰ Subducção é uma área de convergência de placas tectônicas, na qual uma das placas desliza para debaixo da outra. Opção da teoria vigente para compensar o constante nascimento de placas basálticas em cadeias mesoceânicas.

¹²¹ On the basis of the present and earlier studies, a mineral-stability series in weathering is proposed. The arrangement of the common rock-forming minerals in this series is found to coincide with the reaction series. Experimental work on the attack of silicate minerals by water is in accord with the suggested series.

¹²² Elaboração pelo autor, adaptado de SKINNER et al. (2003, p.115) e de TEIXEIRA et al (2009, p.221).

GAILLARDET et al. (1999)¹²³ e DESSERT et al. (2003)¹²⁴ estimam que atualmente 25-35% do total de CO₂ absorvido por intemperismo de silicatos é representado por intemperismo de basalto. Além disso, episódios de intenso vulcanismo basáltico no passado podem ter resultado na remoção líquida de CO₂ atmosférico, em vez de adição de CO₂, como normalmente se pensa (DESSERT et al., 2003). Isto é porque "o consumo de CO₂ pelo desgaste subsequente dos minerais de basalto pode ser maior do que a quantidade de CO₂ que acompanha a desgaseificação da extrusão original do basalto" (BERNER, 2004, p.37).

Nas últimas décadas, "o uso de registros isotópicos de oxigênio, principalmente de foraminíferos em mar profundo, revolucionou a Paleooceanografia em geral, e refinou o registro do nível do mar a longo prazo, em particular" (MILLER et al., 2005¹²⁵, apud CRONIN, 2010, p.69).

Segundo Meyerhoff (1996, p.48), "Um poderoso argumento para a existência de uma bacia oceânica dentro do Gondwana no Ordoviciano Tardio e ao final do Paleozoico é a ocorrência, em ambas vezes, de glaciação em grande escala." As geleiras não poderiam cobrir um continente do tamanho do pretenso Pangea, pois seria fisicamente impossível iniciar e nutrir geleiras em seu interior. Assim, supõe-se que o interior do Pangea teria sido um vasto território deserto, como partes do interior da Sibéria hoje, e não uma região de geleiras continentais. A glaciação requer a interação de correntes quentes do oceano, ar quente carregado de umidade e ventos frios gerados pelo gelo glacial. Entretanto, a glaciação também seria possível se o pretenso Pangea estivesse coberto por águas.

No Devoniano (416-359 Ma) surgem os primeiros indícios de plantas e animais terrestres. Segundo WARD (2015, p.172), "William Lander, em Wales, encontrou fósseis da Cooksonia, registro da mais antigas plantas terrestres (417 Ma)". O período Devoniano é

¹²³ Newly compiled data on the 60 largest rivers of the world are used to calculate the contribution of main lithologies, rain and atmosphere to river dissolved loads. The results of this study highlight the coupling between the physical and the chemical processes of silicate weathering. Only an active physical denudation of continental rocks seems to be able to maintain high chemical weathering rates and significant CO₂ consumption rates.

¹²⁴ This study attempts to characterize the chemical weathering of basalts and to quantify the flux of carbon transferred from the atmosphere to the ocean during this major process at the surface of the Earth. To this aim, we have compiled different published chemical compositions of small rivers draining basalts. Runoff and temperature are the main parameters controlling the chemical weathering rate and derived CO₂ consumption during basaltic weathering. It appears that volcanic activity not only acts as a major atmospheric CO₂ source, but also creates strong CO₂ sinks that cannot be neglected to better understand the geochemical and climatic evolution of the Earth.

¹²⁵ We review Phanerozoic sea-level changes on various time scales and present a new sea-level record for the past one hundred million years. Long-term sea level peaked at 100±50 m during the Cretaceous, implying that ocean-crust production rates were much lower than previously inferred.

marcado por uma redução no CO₂ atmosférico, bem como uma elevação no O₂. Quanto ao nível do mar, este se mostra menor do que nos períodos anteriores. E surgem os primeiros animais terrestres. A explosão do Cambriano havia ocorrido 150 milhões de anos antes. Por que plantas e animais não haviam saído dos oceanos anteriormente? Talvez a resposta seja: porque os oceanos cobriam quase toda a superfície do planeta (excetuando cumes vulcânicos). Um possível dilúvio advindo com cometa(s) na explosão cambriana, só então começava a baixar. O oxigênio liberado pela fotossíntese é proveniente da quebra da molécula de H₂O. Sem a presença de H₂O em larga escala não haveria fotossíntese em larga escala.

O fim da Era Paleozoica (300-270 Ma) experimentou uma das maiores transições no Permo-Carbonífero, quando o clima global emergiu de um mundo glacial prolongado, sem paralelo até o Cenozoico Tardio, para um clima muito mais quente. Novas evidências sugerem que a alteração global pode ser atribuída a um aumento de 5-10 vezes nas concentrações de CO₂ na atmosfera, de perto dos níveis pré-industriais (200-300 ppmv) para valores superiores a 2.000 ppmv (CRONIN, 2010)¹²⁶.

Figura 20 - Estágios iniciais no ciclo de vida de plantas do sistema de raízes stigmária

Os dois desenhos da esquerda (Phillips e DiMichele, 1992) mostram os estágios iniciais no ciclo de vida de plantas do sistema de raízes "stigmária", como o *Lepidodendron* e a *Sigillaria* (à direita).¹²⁷

¹²⁶ Síntese do texto entre as páginas 67-69.

¹²⁷ Fonte: http://paleobiol.geoscienceworld.org/content/31/2_Suppl/77/F6.large.jpg.

Os arenitos são as camadas inconsistentes dos ciclotemas¹²⁸ do carvão. "Devido a variações bruscas de espessura, é preferível considerar esses arenitos como formação de corpos lenticulares em vez de folhas tabulares. Raízes no sistema Stigmarian, embora ocasionalmente ramos de *Lepidodendron* e *Sigillaria*, são derrubados e ficam paralelos à estratificação" (WILLIAMSON, 1967, p.55-56)¹²⁹. São florestas com raízes aquáticas (ver Figura 20).

Tabela 8 - Abundância de carvão recuperável em função da idade geológica

Abundância de carvão potencialmente recuperável em função da idade geológica.	
Período	Massa de carvão (10^{15} mol/my)
Cambriano	0
Ordoviciano	0
Siluriano	0
Devoniano	1
Carbonífero	31
Permiano	53
Triássico	1
Jurássico	30
Cretáceo	15
Terciário	19

Massas normalizadas por unidade de tempo para relativizar as extensões dos períodos geológicos.¹³⁰

Em suas considerações climáticas, Williamson (1967, p.221) observa: "Assim, a ausência quase total de anéis de crescimento nas plantas carboníferas do Hemisfério Norte sugere que um clima tropical (sem ritmo sazonal bem marcado), em vez de um clima temperado, prevaleceu durante toda a acumulação das turfas. Em contraste, o carvão Permiano dos continentes do Sul e da Índia foram desenvolvidos a partir de uma flora muito diferente daquela do Carbonífero. Esta, a flora do Gondwana, expõe anéis de árvores indicativos das variações climáticas sazonais bem definidas." Em nosso entender, essas observações possibilitam que as plantas carboníferas tenham crescido dentro d'água (ver

¹²⁸ Ciclotemas são sequências de camadas sedimentares que se repetem em ciclos referentes a transgressões e regressões marinhas sucessivas em ambiente litorâneo.

¹²⁹ Este livro fala sobre mineração de carvão, suas origens e propriedades; fósseis e estratos do carbonífero.

¹³⁰ Elaboração própria do autor. Adaptado da Tabela 3.2, Berner, 2004, p.48.

Tabela 8). Durante o Permiano, os oceanos podem ter descido de nível, com o rifteamento da crosta.

"Na modelização do CO₂ atmosférico no Fanerozoico, realizada com o GEOCARB III, repentinas e rápidas perturbações podem ser trazidas por impactos de bólidos extraterrestres, erupções vulcânicas massivas, e desgaseificação de CH₄ seguida pela oxidação de CH₄ em CO₂. Normalmente, são 500.000 anos para retornar à estabilização" (BERNER, 2004, p.77-78).

Pela avaliação das proporções de isótopos de chumbo no urânio de Meishan - China, um grupo do MIT, liderado por Sam Bowring (2014), coloca a duração da extinção do Permo-Triássico como não superior a 60.000 mil anos. Suas observações são confirmadas por Burgess (2014). Foi um evento "geologicamente instantâneo".

Em 2012, um grupo de pesquisa, tentando entender porque a vida levou tanto tempo para voltar a povoar os mares após a extinção Permo-Triássica, publicou um artigo¹³¹ indicando que eles obtiveram uma temperatura de 104°F no mar e um forno de 140°F em terra! "As máximas temperaturas ocorreram no intervalo de tempo conhecido como estágio Smithian (um milhão de anos em torno de 247 Ma), tendo sido as mais altas temperaturas conhecidas desde que os animais apareceram" (WARD, 2015, p.227).¹³²

O oceano se aquece ... mas restitui lentamente o calor acumulado porque não é um bom condutor térmico. "Converte o calor de irradiação absorvido em energia molecular através da evaporação; em energia química, em função da matéria orgânica que o habita; em energia mecânica, graças a seus rompantes e às correntes marinhas" (VERNADSKY, 1926, p.63).

Quanto aos depósitos de sal do início e do final do Paleozoico, "normalmente pensamos na formação de evaporitos¹³³ sob climas quentes, onde a evaporação excede o influxo de água, associados a áreas onde prosperam recifes e fusulinídeos", observa Meyerhoff (1996, p.45). Entretanto, minha experiência pessoal me permitiu observar lagos salgados em formação na cordilheira Tien Shan, Quirguistão, a partir de percolação de água

¹³¹ O artigo foi publicado em <http://phys.org/news/2012-10-tropical-collapse-lethal-extreme-temperatures.html>.

¹³² A study jointly led by the University of Leeds and China University of Geosciences (Wuhan), in collaboration with the University of Erlangen-Nurnburg (Germany), shows the cause of this lengthy devastation was a temperature rise to lethal levels in the tropics: around 50-60°C on land, and 40°C at the sea-surface. Lead author Yadong Sun.

¹³³ Sulfatos, halogenetos, boratos e carbonatos formados a partir de sal dissolvido.

no subsolo. Similarmente, encontrei lagos de água doce em meio ao salar do Atacama, Chile, assim como encontramos inúmeros lagos salgados na planície inundável¹³⁴ matogrossense (ver Figura 21). Evidências geoquímicas foram acumuladas por Hardie (1990¹³⁵, 1991¹³⁶) para mostrar que há outros fatores, além do clima, extremamente importantes na formação de evaporitos. Nosso interesse ao sal se deve a nosso descontentamento com as explicações correntes para a formação de evaporitos, através dos "ciclos de Wilson"¹³⁷.

Figura 21 - Vista aérea de salina na planície inundável mato-grossense¹³⁸

As importantes sequências evaporíticas britânicas são limitadas aos sistemas Permiano e Triássico. Os depósitos, com muitas centenas de pés de espessura, não são simplesmente o resultado da evaporação total de uma massa de água estática. "Calcula-se que o total de um corpo de águas com profundidade, como o Mediterrâneo só iria formar cerca de 80 pés (24,4 m) de sais, e há muitas indicações de que evaporitos se formam em depósitos de águas rasas" (WILLIAMSON, 1967, p.39). Ou seja, para formação dos depósitos do pré-sal, nas plataformas continentais brasileira, seria necessário que todos os oceanos se evaporassem integralmente.

O Triássico é um episódio único, caracterizado pelos climas mais áridos do Fanerozoico. Apesar de todo o Triássico ter sido árido, o Inferior foi o único a não deixar

¹³⁴ Efetivamente, o "pantanal" não é pântano ou fundo de mar. Adotamos a denominação de Aziz Ab'Saber.

¹³⁵ Offers an hypothesis for the origin of those MgSO₄-poor potash evaporites that accumulated in extensional fault block basins. Modern active rift and transtensional strike-slip basins are notable for their hydrologic closure and their arid climates regardless of latitude (orographic deserts). In addition, it is now well documented that modern active rift and strike-slip systems, both oceanic and continental, are zones of upwelling hydrothermal CaCl₂ brines rich in Na, K and Ca but poor in Mg and SO₄.

¹³⁶ Upper Permian Zechstein evaporites that underlie the Northwest European basin.

¹³⁷ Ciclo completo de formação, desenvolvimento e fechamento de um oceano relacionado à tectônica de placas. Teoria proposta em 1965 por John Tuzo Wilson (1908-1993), defensor da teoria de expansão e contração do planeta. Os depósitos de sal resultariam desses fechamentos de oceanos.

¹³⁸ Fonte da ilustração: <https://www.embrapa.br/pantanal/flora-e-paisagens-do-pantanal>.

qualquer registro de florestas equatoriais ou solos que reflitam a alta pluviosidade que deveria ocorrer na Zona de Convergência Intertropical. "As plantas terrestres haviam sido submetidos a uma redução catastrófica na diversidade e quantidade ao final do Permiano, mas a aridez Triássico era tão difundida que quase não existiam áreas onde as plantas terrestres pudessem prosperar e influenciar o clima" (CROWLEY, 1998¹³⁹, p.116).

Tabela 9 - Comparativo de altura média dos continentes¹⁴⁰

Altura média dos continentes		
Descrição	Altura (m)	(Ma)
Triássico - Estágio Scythian (*)	1.375	250
Triássico - Estágio Carnian (*)	1.250	230
Continentes atuais (**)	623	hoje
Antártida (**)	2.050	hoje
(*) CROWLEY, 1998, p. 125. (**) CPRM - Terra em números.		

O Scythian é considerado o estágio mais árido do Triássico, e provavelmente o momento mais árido do Fanerozoico (ver Tabela 9). Houve extensa deposição de evaporitos. As areias eólicas (*loessíticas*) são generalizadas, indicando condições extensivas do deserto. Sedimentos terrestres vermelhos são característicos; eles implicam num lençol freático raso que permite a oxidação dos sedimentos. "Não há evidência de carvões equatoriais, embora encontremos alguns carvões formado em latitudes elevadas" (CROWLEY, 1998, p.117-118).

Tetrápodes¹⁴¹

No Triássico, assim como no Cambriano, surgiram novos corpos, uma diversidade de novas formas. Os anfíbios desenvolveram patas. Mas os músculos das 4 patas laterais também eram usados para respiração. Ou se respira, ou se move. "A solução da natureza foi colocar as patas mais juntas, ou usar apenas 2 (pássaros e dinossauros de 2 patas)" (WARD, 2015, p.229).

¹³⁹ A significant problem has developed to modeling climate change on tectonic time scales. Comparison of modeling results with paleo-data sometimes indicate significant discrepancies. Possible explanations are: there are some fundamental inadequacies in the model physics; the paleo-data are open to reinterpretation; or the tectonic boundary conditions for the paleo-reconstructions were not correctly specified.

¹⁴⁰ Comparativo de "nível" do mar, em elaboração própria do autor.

¹⁴¹ Quadrúpedes.

O geólogo Arthur A. Meyerhoff, considera que, para o Triássico Inferior, a geografia atual - e não a do Pangea - é a que melhor responde à distribuição do réptil *Lystrosaurus*.

Implícita na interpretação de Charig (1971) é a ausência de uma bacia do oceano profundo, largo, como o postulado oceano interior Tethys. A probabilidade de que Charig esteja correto é ilustrada pelo mapa derivado de computador de Cosgriff (1982), no qual os autores mostram a distribuição do réptil *Lystrosaurus maccaigi* no Triássico Inferior. Essa distribuição (Antártida, África, Rússia, Índia, China, Vietnam) é muito mais fácil de explicar em termos da geografia moderna do que no mapa Pangea, por causa das distâncias mais curtas que *Lystrosaurus maccaigi* precisaria ter viajado. Embora no futuro possamos encontrar o fóssil *Lystrosaurus maccaigi* nos continentes em que ele agora é desconhecido (Américas, Austrália), sua ausência da Austrália, pelo menos, é mais fácil de entender, com base na geografia de hoje. (MEYERHOFF, 1996, p.14)

O tetrápode *Lystrosaurus*, do Triássico Inferior (ver Figura 22), está presente na Índia, África, Antártida, Vietnam, oeste da China, e na bacia de Moscou. As ocorrências na antiga União Soviética foram descritas por Kalandaze (1975). "Temos comentado sobre o fato de que a Índia e Ásia nunca foram separados por qualquer grande distância" (MEYERHOFF, 1996, p.16; CHATERJEE e HOTTON, 1992¹⁴²; e outros).

Figura 22 - O *Lystrosaurus georgi*, Rússia Central europeia; Triássico Inferior

Lystrosaurus georgi - Kalandadze (1975), Therapsida: Anomodontia: Lystrosauridae. Nizhny Novgorod Region, central European Russia; Early Triassic.¹⁴³

¹⁴² A kinematic model of the evolution of the Indian plate since the Late Jurassic. Tectonics of the ocean basins. Origin of midocean ridges. Paleofloras, faunas and continental drift: some problems areas &c.

¹⁴³ Disponível em: <http://ornithodira.narod.ru/Exposition/catalog/20.htm>. Acesso em 1/3/2016

Anoxia oceânica¹⁴⁴

A baixa oxigenação, ou anoxia oceânica, ocorre tanto em mares rasos como em profundos. Precisamente em torno desse evento de extinção em massa no Permo-Triássico, o chert¹⁴⁵ normalmente vermelho virou um preto profundo, assim como tudo morreu. Existe também evidência de aquecimento global no momento da extinção, e a coincidência das erupções de lava da Sibéria quase que simultâneas à essa extinção de há cerca de 252 Ma.

No Jurássico e Cretáceo, anoxia oceânica e efeito estufa foram extraordinários eventos geológicos e climáticos globais testemunhando aquecimento global extremo, maciço soterramento de carbono orgânico, interrupção do ciclo do carbono, anoxia quase global nos oceanos do mundo, e as maiores crises bióticas (ver Tabela 10). "O xisto preto é uma litologia típica de sedimentos marinhos do Cretáceo depositados em ambientes de águas rasas, preservados e expostos nos continentes atuais. Outro interesse nestes folhelhos negros do Jurássico e Cretáceo é que eles contêm imensa quantidade de carbono orgânico enterrado, o que constitui uma grande proporção de rochas geradoras de petróleo conhecidas do mundo" (CRONIN, 2010, p.72).

Tabela 10 - Eventos de anoxia oceânica no Jurássico e Cretáceo¹⁴⁶

Anoxia oceânica no Jurássico e Cretáceo (OAE = Ocean Anoxic Event)					
Período	OAE #	Estágio	Idade	Nome do evento	Características
Cretáceo	OAE 3	Coniaciano - Santoniano	86		
Cretáceo	OAE 2	Cenomaniano - limite Turoniano	93	Bonarelli	Evento global, quente, mar elevado
Cretáceo	OAE 1d	Albiano tardio	99	Breistroffer	
Cretáceo	OAE 1c	Albiano superior	102	Toolebuc	
Cretáceo	OAE 1b	Aptiano superior - Albiano inferior	109-113	Leenhardt-Urbino, Paquier Monte Nerone, Jacob-113	Três picos, diversos nomes
Cretáceo	OAE 1a	Albiano inferior	120	Goguel, Selli	Evento global
Cretáceo	Weissert	Valanginiano - Heuteriviano	132	Weissert	Evento global
Jurássico	OAE	Toarciano	183	Posidonieschiefer	Evento global

¹⁴⁴ Anoxia oceânica, ou baixa oxigenação, tanto em mares rasos como em profundos.

¹⁴⁵ Rocha geralmente de cor clara, constituída basicamente por sílica fina, microcristalina.

¹⁴⁶ Elaboração pelo próprio autor, adaptado da Tabela 3.2, CRONIN, 2010, p.72. Muitos outros possíveis OAES regionais foram identificados, além destes.

Fauna e flora se adaptam a variações nos índices de oxigênio de gás carbônico. "O índice de estômatos¹⁴⁷ (para as folhas fósseis, estimativa de CO₂) e os registros de proxy carbonato de pedogênicos mostram que os níveis de CO₂ atmosféricos foram elevados durante a era Mesozoica" (CRONIN, 2010, p.75). É provável que cada OAE (Ocean Anoxic Event) tenha experimentado múltiplas e diversas condições, como: processos oceânicos; fonte de carbono (metano, H₂S, extinção em massa etc.); grande província ígnea (superplumas).

O vasto programa de observações e experimentações de natureza espectro-fotométrica, que Gabriel Adrianovich Tikhov (1875-1960) empreendera durante 30 anos, veio demonstrar que "a radiação refletida por uma espécie vegetal depende em grande parte das condições climáticas vigentes na época do desenvolvimento da planta" (PEREIRA, 1980, p.43). Os vegetais de hoje estão adaptados quimicamente também às propriedades óticas da atmosfera terrestre atual.

Convergência biogeográfica

O paleobiólogo Alan Feduccia concluiu que os pássaros foram bastante difundidos no tempo do aparecimento do Archaeopteryx, há cerca de 140-135 Ma. "Feduccia acredita que muitos deles morreram com os dinossauros, há 65 Ma, e que os antecessores dos pássaros atuais se desenvolveram depois, entre 65 e 53 Ma, independentemente dos dinossauros, numa evolução convergente¹⁴⁸, onde a seleção natural, independentemente, produz morfologias similares" (WARD, 2015, p.321).

Os fatos biogeográficos primários são ditados por uns poucos fatos astronômicos. Primeiro, a radiação solar colimada¹⁴⁹. Segundo, a obliquidade do eixo de rotação da Terra e sua órbita, que juntos produzem a sazonalidade anual do globo (ver Figura 23). "A característica fundamental do trópicos não é o calor ou a umidade, que podem variar consideravelmente em savana tropical ou floresta tropical; ao contrário, é a constância relativa de condições, isto é, um nível comparativamente baixo de flutuações ambientais" (MEYERHOFF, 1996, p.3).

¹⁴⁷ Estômatos são estruturas da epiderme das partes aéreas das plantas, encontrados principalmente na superfície inferior das folhas. Eles são dotados de células que permitem um mecanismo de abertura e fechamento e sua função é permitir as trocas gasosas entre a planta e o ar atmosférico.

¹⁴⁸ Convergência evolutiva é a aquisição de características semelhantes, adequadas ao ambiente, em seres de origens diferentes. A capacidade de voar, por exemplo, surgiu independentemente nas aves, mamíferos, insetos e nos peixes-voadores, que podem voar 400 metros e chegar a 70 km/h ao fugir de predadores.

¹⁴⁹ Colimar é observar com instrumentos adequados.

Figura 23 - A menor flutuação ambiental da região intertropical.¹⁵⁰

Além das características geográficas devemos ressaltar o nível de diferenciação climática presente durante a Fanerozoico. "A presença de crocodilos eocênicos ao norte de Ellesmere Island (norte do Canadá) de palmeiras durante o Cenozoico Inferior no centro-oeste da Groenlândia e no sul do Alasca, e de manguezais na bacia de Paris durante o Eoceno Inferior deixam isso claro" (MEYERHOFF, 1996, p.5).

Em seu trabalho sobre flora e fauna do Mesozoico, Charles Smiley conclui que "os dados combinados são melhor explicados pelas estabilidades continental e polar do que por deslocamento significativos" (SMILEY, 1992, p.254):

- Carbonatos marinhos contendo fauna amonite¹⁵¹ mostram uma zonação latitudinal similar àquela conhecida do final do Paleozoico;
- A fauna marinha Cenozoica, plantônica e bentônica¹⁵², parece ter mantido sua zonação latitudinal, conforme as coordenadas geográficas modernas.
- Registros de vertebrados terrestres (tetrápodes) do final do Paleozoico, Mesozoico, e Cenozoico indicam que ao menos as rotas terrestres eram similares às do Quaternário;

¹⁵⁰ Fonte: <http://projetoquartzoazul.blogspot.com.br/2012/04/inclinacao-da-terra-em-seu-eixo.html>.

¹⁵¹ As amonites ou amonoides eram animais marinhos, que ocupavam o nicho ecológico das atuais lulas. Tinham dimensões desde alguns centímetros a um metro de diâmetro. O animal vivia dentro de uma concha espiralada de natureza carbonatada, semelhante à dos nautilóides atuais.

¹⁵² Esses conceitos estão relacionados à forma de como os seres vivos movimentam-se e vivem no oceano. Seres planctônicos são seres mais rudimentares, que se movimentam muito pouco ou nada, e que são arrastados pela correnteza. Bentônicos são seres que vivem apenas no fundo do mar, sendo fixos ou móveis, como estrelas-do-mar ou corais. Aos seres que possuem órgãos que lhes permita deslocar-se voluntariamente na água, como camarões e polvos, denominamos nectônicos.

- Zonação da vegetação terrestre, do final do Paleozoico aos dias de hoje, em conformidade latitudinal aos registros de faunas e sedimentos marinhos, tanto quanto aos padrões de linhas isotérmicas através dos continentes.

Portanto, as observações de Smiley quanto ao Mesozoico, se mostram em acordo com a atual classificação climática de Köppen.¹⁵³

Plantas C4¹⁵⁴

A redução da concentração do CO₂ atmosférico vem acompanhando o resfriamento do planeta, principalmente nos últimos 40 milhões de anos. Assim, extremamente importante foi a evolucionária formação de uma mais eficiente forma de fotossíntese, chamada fotossíntese C4, que suplantou em muitas plantas o arcaico mecanismo denominado C3. Plantas que usam C3 deixam uma assinatura isotópica de carbono diferente daquelas que usam C4.

Devido à alta afinidade com o CO₂, as plantas C4 apresentam uma grande vantagem em relação às plantas C3: elas podem sobreviver em ambientes áridos. Isto se dá porque as plantas C4 só atingem as taxas máximas de fotossíntese sob elevadas intensidades de radiação solar, fazendo com que fixem mais CO₂ por unidade de água perdida; elas são mais econômicas quanto ao uso da água, elas perdem menos água que as C3 durante a fixação e a fotossíntese.

Temos 2 linhas de evidências para demonstrar quando as plantas C4 se desenvolveram. A primeira é o relógio molecular. Pela comparação dos genomas das plantas C3 e C4, geneticistas deduziram que as diferenças são grandes o suficiente para que o mecanismo C4 não tenha se desenvolvido antes de 25 Ma (ou 32 Ma). Entretanto "o registro fóssil nos mostra uma resposta distinta, com os primeiros fósseis de C4 tendo apenas 12 ou 13 Ma" (WARD, 2015, p.316-317). Ou seja, após o término do último período glacial.

A relação entre a pressão parcial do dióxido de carbono atmosférico (pCO₂) e do clima Paleogeno (65-23 Ma) está mal resolvida. Mark Pagani (2005¹⁵⁵) fez uso de valores

¹⁵³ Classificação climática de Köppen é o sistema de classificação global dos tipos climáticos mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia. Essa classificação, proposta em 1900 pelo climatologista russo Wladimir Köppen, é baseada no pressuposto de que a vegetação natural de cada grande região da Terra é uma expressão do clima nela prevalecente.

¹⁵⁴ São plantas tropicais, como milho, cana-de-açúcar, parte das gramíneas e bromélias.

¹⁵⁵ The relationship between the partial pressure of atmospheric carbon dioxide (pCO₂) and Paleogene climate is poorly resolved. Here we use stable carbon isotopic values of di-unsaturated alkenones extracted from deep sea

isotópicos de carbonos estáveis de alquenones di-insaturados extraídos de núcleos de profundidade para reconstruir o $p\text{CO}_2$ do meio do Eoceno meio ao final do Oligoceno (~ 45-25 Ma). Os resultados demonstram que $p\text{CO}_2$ variou entre 1.000 a 1.500 ppmv no meio para o final do Eoceno, e, em seguida, diminuiu em várias etapas durante o Oligoceno, até chegar aos níveis atuais (cerca de 400 ppmv). A queda na $p\text{CO}_2$ que criou as condições para o início da fotossíntese C_4 terrestre, também permitiu a expansão crítica das camadas de gelo que hoje pairam sobre a Antártica.

A presença de fósseis de plantas C_4 , típicas de ambientes tropicais, nas encostas dos Himalaias é usada como prova de que esta cordilheira teria se erguido depois disso. Ou seja, as plantas proliferaram numa planície que se ergueu com o choque entre Índia e Ásia. Entretanto, este aquecimento no Eoceno é compatível com a presença desses fósseis C_4 em altitude, ou seja, que estas proliferaram em altitude.

3.4 – Continentes e Oceanos.

Na medida em que os continentes se movam, ou que as águas os cubram, essa redistribuição de massas tem um importante efeito na heterogeneidade do balanço de energia da Terra, em virtude das diferenças nas propriedades térmicas e no albedo de terras e oceanos.

A paleogeografia (ver Tabela 11 e Figura 24) permite a admissão de muitas soluções e nomes para seus problemas: Pangea, Rodínia, Gondwana, Tethys, Iapetus, isostasia, subducção, subsidência, sinclinal. Eu me permito o uso do nome Omnigea para a crosta primordial, que cobria 100% da esfera terrestre. É bem mais amplo e, logicamente, contém o Pangea.

cores. The fall in $p\text{CO}_2$ likely allowed for a critical expansion of ice sheets on Antarctica, and promoted conditions that forced the onset of terrestrial C_4 photosynthesis.

Tabela 11 - Uma possível paleogeografia do Fanerozoico¹⁵⁶

Paleogeografia do Fanerozoico				
Nome	Tipo	Era	Idade (Ma)	Comentário
Rodínia	terra firme	Neoproterozoico		
Gondwana	terra firme	Neoproterozoico - Carbonífero	650-350	Hemisfério sul, intercalado ao Pangea
Pangea	terra firme	Permiano - Jurássico	350-185	Quebra aos 185 Ma
Laurussia	terra firme	Paleozoico	650-330	Intercalado ao Gondwana
Laurentia	terra firme	Paleozoico recente	540-450	Intercalado ao Gondwana
Laurásia	terra firme	Paleozoico - Mesozoico	350-185	Norte do Gondwana
Atlântico	oceano	Jurássico-Cenozoico	185-0	Abertura no Jurássico
Pantalassa	oceano	Paleozoico - Jurássico	540-160	Predecessor do paleo-Pacífico
Iapetus	oceano	Neoproterozoico-Permiano	560-320	
Tethys	oceano	Mesozoico-Cenozoico	250-3	Vários estágios, proto-, paleo-, neo-Tethys

Figura 24 - Uma possível evolução da disposição dos continentes no Fanerozoico.¹⁵⁷

Exemplos de influência do clima pela tectônica, segundo Crowley (1998, p.5-12):

¹⁵⁶ Adaptado de Cronin, 2010, p.58, tabela 3.1.

¹⁵⁷ Ilustração disponível em <http://diarium.usal.es/gabi/p085/>.

- Configuração continental - distribuição terra-mar, latitude, separação entre continentes, circulação oceânica ;
- Nível do mar - precipitação, ciclo geoquímico;
- Orografia - alterações na elevação e no CO₂;
- Passagens oceânicas - Mar de Tethys, o istmo centro americano, a Passagem de Drake, a passagem Austrália-Antártida, o estreito da Indonésia, a elevação Greenland-Faeroes;
- Batimetria - circulação oceânica, passado não realístico;
- Efeitos das condições limites tectônicas nos níveis de CO₂ atmosférico (espalhamento de assoalho oceânico; atividade de plumas mantélicas, erosão).

Nível do mar

Imagem extrema do efeito do nível do mar envolve o Ordoviciano Tardio (440 Ma), onde a reconstrução paleogeográfica (SCOTSESE, 1992)¹⁵⁸ "apresenta uma área terrestre menos do que a metade da atual" (CROWLEY, 1998, p.9); poucas partes da crosta continental estariam emersas (ver Gráfico 6).

A probabilidade de se perder o registro estratigráfico através de um subsequente enterramento profundo, metamorfismo e erosão aumenta com o tempo, e assim os mapas para períodos mais velhos são mais propensos a subestimar a antiga extensão da cobertura marinha. Áreas cratônicas, na antiga União Soviética e América do Norte, contêm muito mais substanciais proporções de carbonatos/ siliciclásticos no Paleozoico que no Mesozoico, o que implica mais fontes de sedimentos regionalmente restritos e de relevo suave (HALLAM, 1992, p.211).

¹⁵⁸ Estes paleomaps consideram indevidamente as linhas de costa, e não as plataformas continentais.

Gráfico 6 - Nível dos oceanos e temperaturas globais no Fanerozoico.¹⁵⁹

Nível do mar global médio (eustático) e mudanças de temperatura globais significativas para o Fanerozoico em comparação aos dias de hoje.¹⁶⁰

A ideia de que o oeste dos Estados Unidos se ergueram no Terciário Tardio está baseada em argumentos geomorfológicos (DAVIS¹⁶¹, 1909) de que "a extensiva erosão superficial no sudeste das Montanhas Rochosas, no Eoceno Tardio, deve ter ocorrido junto ao nível do mar" (CROWLEY, 1998, p.80).

¹⁵⁹ Fonte: http://dspace.jorum.ac.uk/xmlui/bitstream/handle/10949/993/Items/SXR260_1_section3.html. 10/8/2015.

¹⁶⁰ As linhas do nível do mar e da temperatura global atuais são baseadas em médias para o conjunto do Pleistoceno, afetado por numerosas glaciações, baixando as médias de nível do mar e temperatura em relação aos valores de hoje.

¹⁶¹ His most influential scientific contribution was the cycle of erosion, first defined around 1884, which was a model of how rivers create landforms. His cycle of erosion suggests that larger rivers have 3 main sections: upper, middle and lower course - each of which has distinct landforms and other properties associated with it.

Figura 25 - O nível do mar na América do Norte, no Cretáceo.¹⁶²

Rochas marinhas de entre o Cretáceo Superior e o Terciário (~65Ma) depositadas em altitudes de 300-800 m no oeste do Canadá, muito acima das estimativas razoáveis do nível do mar para esse intervalo (ver Figura 25). Fósseis marinhos paleocênicos foram observadas a 661 m, em Turtle Mountain, Manitoba (BAMBURAK, 1978¹⁶³), a 800 km da frente de inundação (CROWLEY, 1998, p.153).

"Então, o que é nível do mar? É uma média de 50 cm menor no Atlântico do que no Pacífico. É cerca de 25 cm maior no lado oeste do canal do Panamá do que no lado leste. Nível do mar é um monte de coisas, menos nível. Lembre-se que nível do mar é uma constante (que deve ser revisada a cada 25 anos)" observa McCully (2013, p.92).

Para que o nível do mar subisse 200 m, o volume de água (ver Tabela 12) precisaria subir 5%. Porém, o gelo antártico mais a água subterrânea são apenas 3%. Para deixar fósseis em Turtle Mountains, Manitoba (600 m), precisaríamos de mais 10% de água nos oceanos. Como a área oceânica também cresceria e a profundidade média decresceria, então precisaríamos de mais uns 15% de água no planeta para provocar as inundações do Cretáceo. Poderiam essas rochas e fósseis ter sido depositados por ondas?

¹⁶² Fonte da ilustração: United States Geological Survey. Acesso em 1/3/2016.

¹⁶³ The Turtle Mountain study area is situated on the northeastern rim of the Williston Basin, a negative structure on the craton. During the last Cretaceous marine transgression and regression, the Riding Mountain and Boissevain Formations were deposited. In the Paleocene, after a short erosional interval, deposition of Turtle Mountain Formation occurred.

Tabela 12 – Volume de água nos oceanos¹⁶⁴

Oceano	Profund (m)	Área (10 ⁶ km ²)	Vol (10 ⁶ km ³)
Pacífico	4.280	166,0	710,5
Atlântico	3.330	82,2	273,7
Índico	3.890	73,6	286,3
Ártico	990	12,2	12,1
Total	3.926	334,0	1.311,3

Passagens marítimas

Os oceanos são grandes armazenadores de calor, distribuídos à atmosfera. As correntes oceânicas atuam significativamente nessa distribuição. As grandes correntes oceânicas são influenciadas pelos estreitos ou passagens marítimas (ver Figura 26). E estes podem ter variado ao longo dos tempos, de acordo com o nível do mar em relação aos continentes.

Figura 26 - Mapa do GSR (Greenland-Scotland Ridge)¹⁶⁵

Amplas evidências sugerem que a subsidência¹⁶⁶ da elevação Groenlândia-Escócia não seguiu a os padrões de subsidência termal associado com a crosta oceânica normal. "Especula-se que isto esteja provavelmente relacionado a mudanças no fluxo de material do

¹⁶⁴ Tabela elaborada pelo autor, a partir de dados do IBGE. O volume de água nos oceanos é diretamente proporcional à profundidade e à área.

¹⁶⁵ O Mapa do GSR (Greenland-Scotland Ridge), com as passagens indicadas pelas setas. Números dão os volumes típicos transportados em cada passagem. A seta sólida mostra o estouro FBC; setas tracejadas indicam os transbordamentos do Wyville Thomson Ridge (WTR), o Islândia-Faroe Ridge (IFR) e o Estreito da Dinamarca (DS). A área cinza é menor do que 750 m (OLSEN et al, 2008).

¹⁶⁶ Afundamento, decantação, rebaixamento abrupto ou paulatino.

manto em função da pluma¹⁶⁷ abaixo da Islândia. Entretanto, as mudanças ao longo da elevação Groenlândia-Escócia não são suficientes para explicarem sozinhas a tendência de longo prazo para um clima mais frio durante o Neogeno" (23,3-1,8 Ma) (CROWLEY, 1998, p.206). Ou seja, alegar que estas modificações climáticas foram provocadas por um sobe e desce de fundos marítimos, mesmo se isso pudesse ser comprovado, seria insuficiente.

"A mais nova anomalia magnética identificada no oeste do Mar de Escócia (Antártida, ao sul das ilhas Malvinas e Geórgias) recebeu datação de 28,7 Ma. Essa evidência nos leva a datar a abertura da Passagem de Drake (ver Figura 27) como tendo ocorrido no Oligoceno Tardio, ou posterior, embora os grandes movimentos de placas coloquem a ponta da Península Antártica bem a leste do extremo sul da América do Sul por 30 Ma" (CROWLEY, 1998, p.215).

Figura 27 - Mapa da Passagem de Drake, no Mar de Escócia, Antártida.¹⁶⁸

As marés na Baía de Fundy, no Canadá, podem esporadicamente atingir a cerca de 20 metros (ver Apêndice A – As Marés.). As altitudes mínimas a América Central chegam a cerca e 20 metros. Ou seja, estamos falando de uma mesma ordem de grandeza, ao supor que circunstâncias especiais poderiam levar o Atlântico se encontrar ao Pacífico na América Central, mesmo sem elevar ou afundar a crosta continental.

¹⁶⁷ Plumas mantélicas são hipotéticos estreitos condutos de material quente que ascendem do manto profundo, ou do núcleo, até a superfície da Terra e que são invocados para explicar alguns tipos de vulcanismo.

¹⁶⁸ Ilustração obtida em http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/06sounds/media/regional_600.html.

3.5 – Mudanças Climáticas Orbitais.

O geólogo russo Vladimir Vladimirovich Belousov¹⁶⁹ (1907-1990) dedicou sua vida aos estudos tectônicos e geofísicos. Ele era convicto de que os movimentos crustais eram oscilatórios, harmônicos, como conhecido pelas marés oceânicas. Nas palavras de Belousov (1962, p.11): "A geologia estrutural estuda fácies¹⁷⁰ na história dos movimentos oscilatórios da crosta da Terra. Uma conexão íntima deve ser estabelecida entre geotectônica e cosmogonia, desde a origem da Terra e sua história estrutural".

Figura 28 - Transferência de energia mecânica entre Terra e Lua.¹⁷¹

Entre outras relações astronômicas, há uma transferência de energia mecânica entre Terra, Lua e maré. O efeito dinâmico retarda a rotação terrestre (perda de energia mecânica) e aumenta o momento angular lunar, pelo aumento da distância radial (ganho de energia mecânica). A translação da Lua tem o mesmo sentido da rotação da Terra, mas a rotação acontece em 24 horas, enquanto a translação leva 4 semanas. Gera-se um efeito de fricção (transferência de energia mecânica) da água do mar com os fundos oceânicos. Junto à inércia da própria água, a fricção diminui a rotação da Terra (ver Figura 28). Efeito similar é exercido pela Terra sobre a Lua, que até já deteve o movimento de rotação lunar. Segundo McCully

¹⁶⁹ During the 1960s he led 3 expeditions to the East African Rift to study continental structure and the Earth's mantle. Although his theories were unsuccessful within the scientific community, he was an important figure in the development of the Earth sciences within the Soviet union following the World War II.

¹⁷⁰ Unidades geomorfológicas de relevo.

¹⁷¹ Copyright 2005, Pearson Prentice Hall. Disponível em <http://www.askamathematician.com/2013/10/q-could-the-tidal-forces-of-the-sun-and-moon-be-used-to-generate-power-directly/>

(2013, p.87-88), "a rotação da Terra diminuí 1 segundo a cada 41 mil anos, enquanto a distância da Lua cresce cerca de 4 cm ao ano". Na Terra primordial, o dia provavelmente durava 6 horas e a Lua estaria cerca de 320.000 km mais perto da Terra.

Alexis Perrey (1807–1882) foi um sismólogo francês, compilador de catálogos de terremotos. Ele suspeitava de uma correlação entre a Lua e as atividades sísmicas na Terra, e desenvolveu sua teoria com o uso de Estatística. Exemplificando com um momento atual e no Brasil, o professor Paulo Pereira (UFRGS) tinha uma série de dados e a convicção de que eventos vulcânicos e sísmicos tinham relações com apogeu e perigeu da Lua. A conclusão da pesquisa (DUTRA et al, 2007¹⁷²) foi que, estatisticamente, pode existir uma correlação direta entre o movimento da Lua com os sismos e vulcanismo na Terra.

Em estudo mais recente, com uso de amplas bases de dados, cientistas comprovaram o aumento de atividades sísmicas não apenas quando a Lua, nas fases nova e cheia, cruza o meridiano sobre o local afetado, mas principalmente quando a amplitude da maré excede o valor da amplitude prévia (VAN DER ELST¹⁷³ et al., 2016). Ou seja, a correlação não é visível no apogeu e perigeu lunares, mas durante o crescimento das forças de maré.

No grande evento de extinção, no limite Permo-Triássico (~250 Ma), apesar da falta de evidências para suportar que tenha sido um impacto, a compreensão de que um impacto poderia causar a extinção está na mente de todos. "As novas evidências paleontológicas da China sugerem uma espécie de morte rápida. Entre as causas potenciais de extinção em massa, apenas um impacto de asteróide foi pensado como sendo capaz de tal morte em massa em tão pouco tempo" (WARD, 2015, p.215).

Nas palavras de Peter Ward:

Em 2001, uma equipe liderada pelo geoquímico Luann Becker¹⁷⁴ relatou a descoberta de níveis elevados de moléculas complexas de carbono complexos, que receberam o nome ridículo de Buckminsterfullerenes,

¹⁷² The influence of the Moon on Earth's seismic activity is investigated. There is a direct correlation between the synodic period and the number of events, which are significantly in full and new moon phases.

¹⁷³ This study shows that deep, small earthquakes on the San Andreas Fault are most likely to occur during the waxing fortnightly tide—not when the tidal amplitude is highest, but when the tidal amplitude most exceeds its previous value. The response of faults to the tidal cycle opens a window into the workings of plate tectonics.

¹⁷⁴ The Permian-Triassic boundary (PTB) event, which occurred about 251.4 million years ago, is marked by the most severe mass extinction in the geologic record. Recent studies of some PTB sites indicate that the extinctions occurred very abruptly, consistent with a catastrophic, possibly extraterrestrial, cause. Fullerenes (C₆₀ to C₂₀₀) from sediments at the PTB contain trapped helium and argon with isotope ratios similar to the planetary component of carbonaceous chondrites. These data imply that an impact event (asteroidal or cometary) accompanied the extinction.

misericordiosamente encurtados por Buckyballs. Seriam resultantes da colisão de um grande asteróide com a Terra. Só que este atingiu a Terra há 251 milhões de anos atrás. Nesse evento, o irídio não foi encontrado.

A hipótese é a de que as moléculas de carbono em formato de domo aprisionam gases hélio e argônio dentro de suas estruturas de gaiola, e que estes novos indicadores de impacto existiriam em estratos do Permiano Tardio em três locais geográficos diferentes espalhados pelo mundo. Becker e sua equipe interpretaram estes particulares Buckyballs, como de origem extraterrestre, porque os gases nobres presos dentro têm uma proporção incomum de isótopos. Por exemplo, o hélio terrestre é principalmente hélio-4 e contém apenas uma pequena quantidade de hélio-3, enquanto que o hélio extraterrestre, o tipo encontrado nestes fulerenos, é hélio-3. (WARD, 2015, p. 216-217)

Não obrigatoriamente precisaria ter sido um impacto. Uma eventual aproximação da Lua, criando grandes rachadura (rifts) na crosta provocariam os mesmos efeitos. Ademais, observamos que esse hélio-3 mencionado por Luann Becker é fartamente encontrado na Lua (ver Apêndice C – O regolito da Lua.).

Eventos cíclicos

Em publicação de 1840 (*Etudes sur les glaciers*), Louis Agassiz afirmou que os glaciares eram remanescentes de capas de gelo que teriam coberto parte do planeta no passado. No século XVIII, Jean le Rond d'Alembert havia calculado que a força gravitacional do Sol e da Lua sobre a protuberância equatorial da Terra causou o ciclo de 26 ka da precessão dos equinócios. No início do século 20, Pilgrim (em 1904) e Milankovitch (de 1912 a 1950, ver Figura 32) estudaram a ligação do clima orbital (BERGER, 2012)¹⁷⁵.

As rochas são más condutoras de calor. O aporte de energia vindo do interior do planeta quase não influi na temperatura superficial (ver Apêndice G – Perda de energia pela Terra.). "O calor recebido do Sol é cerca de 6.000 vezes maior que o liberado por condução desde o interior da Terra. Entretanto, este pode ser importante quando falamos do final de

¹⁷⁵ The evolution of ideas from these early times to the present day is briefly reviewed to structure the astronomical theory of paleoclimates over the last two centuries. It might rather be viewed as a pedagogical tool for teaching some of the basic concepts in a historical context.

uma glaciação ou do deslizamento de uma geleira" (MEDIIVILLA, 2004, p.312) (ver Figura 29).

Figura 29 - Calor planetário lubrificando geleiras

Ante o calor planetário, a geleira tem seu movimento lubrificado pelo derretimento da base.¹⁷⁶

As teorias climáticas orbitais explicam ciclos glacial-interglacial e outras mudanças ambientais causadas por diferenças na insolação geográfica e sazonal por variações da geometria orbital em dezenas de milhares ou centenas de milhares de anos, em função de forças gravitacionais atuantes sobre o planeta. "Além da rotação e da translação, a Terra executa significativos movimentos de precessão, obliquidade e excentricidade, conhecidos há muito tempo; a teoria de Milankovitch¹⁷⁷ (IMBRIE, 1992¹⁷⁸, 1993), de princípios do século XX, foi popularizada e aceita para explicar as glaciações do Pleistoceno" (CRONIN, 2010, p.114).

¹⁷⁶ Ilustração do Ventisquero Negro, San Carlos de Bariloche, Argentina.

¹⁷⁷ A teoria de Milankovitch indica que as glaciações ocorrem quando: (a) o verão começa no afélio (distância máxima entre Terra e Sol); (b) a excentricidade é máxima (distância entre Terra e Sol no afélio é a maior possível); (c) a obliquidade é baixa (diferença entre verão e inverno é fraca e o contraste latitudinal é maior). Fonte: http://sigep.cprm.gov.br/glossario/textos/Cicloestratigrafia_e_Milankovith.pdf.

¹⁷⁸ Addressed the 23 and 41 ka cycles.

Figura 30 - Precessão dos Equinócios.¹⁷⁹

25.868 anos para deslocar-se pelos signos do zodíaco.

No movimento de "precessão" o Pólo Norte descreve um círculo num período de 26 mil anos (ver Figura 30). O impacto climático das mudanças de precessão é maior em latitudes baixas e equivale a cerca de 10% de mudança de insolação por temporada (CRONIN, 2010, p.115).

A "obliquidade" diz respeito à inclinação do eixo de rotação terrestre. Hoje o eixo de rotação é inclinado $23,44^\circ$ em relação ao plano da eclíptica, inclinação esta que diminui gradualmente uma taxa de cerca de $0,5''/\text{ano}$. Um ciclo completo de obliquidade leva cerca de 41.000 anos, com a inclinação variando entre $22,05^\circ$ e $24,5^\circ$. "O efeito climático de maior inclinação é amplificado sazonalmente em altas latitudes, porque as regiões polares recebem relativamente mais radiação do que os trópicos" (CRONIN, 2010, p.116).

A influência das mudanças da "excentricidade" terrestre na insolação¹⁸⁰ é quantitativamente muito pequena. Assim, a pequena variação na insolação devida a um ciclo de excentricidade ($\sim 100\text{ka}$) não poderia diretamente causar diretamente a magnitude dos ciclos climáticos glacial-interglacial que ocorreram a cada $\sim 100\text{ka}$ durante os últimos anos 500.000. "Isso é chamado de enigma dos 100 mil anos" (CRONIN, 2010, p.117).

O movimento da Lua em torno da Terra não é circular, nem ao menos precisamente elíptico, mas mostra muitas irregularidades, algumas delas significativas. Um dos mais populares agregados à hipótese da Nebulosa (Laplace) é a hipótese do Professor George H.

¹⁷⁹ Fonte: <http://raphaelalves.blogspot.com.br/2010/05/os-movimentos-da-terra.html#axzz41HfwYcts>.

¹⁸⁰ A insolação vem a ser o número de horas de brilho solar enquanto a radiação solar global representa a soma da radiação vinda diretamente do Sol, acrescida da radiação difundida pelas partículas e gases da atmosfera.

Darwin de surgimento da Lua. De acordo com sua visão, a Lua era parte da massa da Terra, quando ainda em estado pastoso. Em consequência de excessivamente rápida rotação axial, presumivelmente devido à condensação nebular, a Terra desenvolveu uma grande protuberância equatorial, a qual, por incremento de rotação e auxílio da força de maré solar, finalmente formou uma massa globular e separou-se da Terra. Este corpo continuou a revolver em torno da Terra como seu satélite, e assim se originou a Lua (TAYLOR, 1903, p.17-18).¹⁸¹

Muitos estudiosos apontam que "os movimentos planetários da Terra exibem um comportamento caótico de longo prazo, que vem aumentando" (CRONIN, 2010, p.117). Podem ser resultantes de perturbações planetárias, ou dos movimentos de rotação e revolução junto com a galáxia. Ainda temos muito o que aprender: quanto mais respostas obtemos, mais perguntas colecionamos.

Glaciações

Na década de 1970 foi realizado o primeiro grande esforço multidisciplinar em grande escala para compreender as causas da idade do gelo do Quaternário. "Os projetos CLIMAP¹⁸² (Climate Long-Range Investigation, Mapping and Prediction) e SPECMAP¹⁸³ (Spectral Climate Mapping Project) consolidaram uma grande síntese em apoio à teoria orbital" (CRONIN, 2010, p.121). Pela teoria orbital, as glaciações são iniciadas quando os verões são mais frios, pois a diminuição na insolação inibe a fusão das geleiras, que expandem. O acréscimo da área de mantos de gelo continentais intensifica o albedo e a perda de energia calorífica, tendendo a aumentar ainda mais a área e o volume das geleiras.

John IMBRIE (1992, 1993) centrou-se principalmente nas causas das glaciações em alta latitude no hemisfério norte: "A maior parte do sistema climático é afetado por forçantes orbitais mas a resposta não é nem simultânea nem é igual em magnitude." "A resposta do gelo para forçantes orbitais pode ser mais curta (1-4 ka) ou mais longa (15 ka) e é variável ao longo dos últimos 5 milhões de anos, dependendo da extensão, espessura e localização das

¹⁸¹ Contemporâneo de George Darwin, posteriormente Frank Taylor passou a considerar que a Lua tenha chocado-se com a Terra, o que resultou no rompimento da crosta e na formação dos continentes.

¹⁸² Projeto dos anos 1970/80 destinado a produzir mapas das condições climáticas no Último Máximo Glacial - maior extensão dos mantos de gelo no último período glacial, há aproximadamente 20.000 anos. O projeto foi baseado na coleta e análise de testemunhos de sedimentos terrestres e marinhos.

¹⁸³ Projeto dos anos 1980, produziu um padrão para isótopos de oxigênio em sedimentos marinhos de águas profundas, a partir de foraminíferos em baixas e médias latitudes.

capas de gelo" (CRONIN, 2010, p.124). Ou seja, as efemérides¹⁸⁴ orbitais não implicam em respostas similares, nem em intensidade, nem em duração. Um mesmo ciclo de aproximação ou afastamento solar não resultam numa glaciação similar.

Gráfico 7 - Reconstrução do clima dos últimos 5 Ma, pela razão isotópica do oxigênio¹⁸⁵

A datação absoluta de eventos paleoclimáticos é crítica para confirmação da teoria orbital (ver Gráfico 7). O conceito de glacio-eustasia - nível do mar variante com capas de gelo sobre os continentes - tem sido advogado por Agassiz desde o século XIX (MACLAREN, 1842)¹⁸⁶. Já desde então, considerava-se (WHITTLESEY, 1868)¹⁸⁷ que a variação do nível do mar poderia ser de 100 m - próximo às estimativas modernas de ~125 m. Métodos radiométricos não estão disponíveis para datar depósitos glaciais ou períodos de nível do mar elevado. Entretanto, os "recifes de coral são registro do nível do mar, e seus esqueletos incorporam elementos radioativos" (CRONIN, 2010, p.122).

¹⁸⁴ Uma efeméride é um fato relevante escrito para ser lembrado em um certo dia, ou ainda uma sucessão cronológica de datas e de seus respectivos acontecimentos.

¹⁸⁵ Baseado na razão isotópica do oxigênio, servindo como proxy para a massa global de capas glaciares (original de Lisiecki&Raymo, 2005): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Five_Myr_Climate_Change.png, em 29/2/2016.

¹⁸⁶ A book about the glacial theory of Professor Agassiz of Neuchatel. Being a outline of the facts and arguments adduced by him to prove that a sheet of ice enveloped the northern parts of the globe at a recent geological period.

¹⁸⁷ If the water deposition on the surface of the land is not returned to the sea, it must be subtracted from the common reservoir. At the period of greatest cold, the depression of the ocean level should be, at least, three hundred and fifty or four hundred feet.

Figura 31 - Estágios de controle glacial de recifes em quatro estágios¹⁸⁸.

Os recifes de coral crescem em direção à luz, competindo por espaço (ver Figura 31). Recebem a deposição dos esqueletos calcários de organismos, que são fixados pelas algas. As colônias se formam sobre as estruturas fossilizadas, "da mesma forma que as cidades e que as culturas se edificam sobre elas mesmas" (FREUD, 2006)¹⁸⁹. Essas estruturas fossilizadas nos permitem avaliar a temperatura e salinidade do oceano, bem como o nível do mar ao longo de tempos geológicos.

Incertezas climáticas

Apesar das certezas, também existem incertezas, mistérios e paradoxos na teoria orbital. A transição do Plioceno, ~2,8 Ma, não foi acompanhada por uma tão grande mudança de condições dos oceanos tropicais. Por outro lado, o sistema de monções da Ásia Oriental experimentou claramente uma grande mudança ~2,5 Ma marcada pela substituição dos depósitos de "barro vermelho" pelo padrão loess em sequências estratigráficas chinesas e alterações nas monções asiáticas. "A mudança gradual para maiores períodos glaciais no hemisfério norte, centrada em 2,8 Ma, também está ligada ao fechamento dos *gateways*¹⁹⁰ da Indonésia e da América Central" (CRONIN, 2010, p.130).

¹⁸⁸ Ilustração em <http://scotdir.com/home/sciences-3/how-do-coral-reefs-form>.

¹⁸⁹ Numa exposição geográfica das idéias do pai da psicologia sobre a história da humanidade, Freud sentiu que nossa espécie pagou pelo progresso o elevado preço de sacrificar a vida instintiva e reprimir a espontaneidade.

¹⁹⁰ Estreito ou istmo.

Figura 32 - Ciclos de Milankovitch: excentricidade, obliquidade e precessão¹⁹¹

A excentricidade (94 a 123 ka), a obliquidade (41 ka) e a precessão (26 ka) fazem mudar o modo como o Sol atinge o planeta.

São chamados ciclos de 100 ka seriam extremos de excentricidade na órbita terrestre, e costumam acontecer entre 94 e 123 ka (ver Figura 32). A modelagem climática tem sido essencial nos esforços para simular esses ciclos de 100 ka; no entanto, não há consenso sobre uma única explicação. O paradoxo MIS Estágio 11 foi um extremamente longo (20-30 ka) interglacial datado 394-422 ka nos núcleos de gelo da Antártida e em cerca de 388-410 ka nos registros de profundidade. O MIS 11 é um período de dissolução de carbonato nos oceanos que coincide com uma mudança de baixa a alta amplitude de 100 ka nos ciclos climáticos em meio a época Brunhes de polaridade magnética. (CRONIN, 2010)¹⁹².

Ciência não é uma questão de consenso. As dúvidas podem colocar-nos mais perto da verdade do que as certezas. “Quando se comparam médias, não se sabe com precisão o que se está comparando; sobretudo, nunca se tem certeza que a harmonia encontrada a partir das médias tenha uma raiz na realidade” (BACHELARD, 2009, p. 147). As gaiolas são os lugares onde moram as certezas¹⁹³.

¹⁹¹ Ilustração em: <http://paleopix.com/blog/2013/02/10/orbital-cycles-and-climate/> . Acesso em 12ago2017.

¹⁹² Sumário do conteúdo das páginas 131-133 da referida fonte.

¹⁹³ Palavras de Fiódor Dostoiévski, em Os Irmãos Karamazov.

4 – RESULTADOS.

*When I am looking for a solution to a problem, I never think of beauty.
I only think of how to solve the problem. However, when I am finished,
if the solution isn't beautiful, then I know that it was wrong.*
R. Buckminster Fuller¹⁹⁴

Em nossa pesquisa buscar entender os tempos e eventos que determinaram as grandes mudanças climáticas no Fanerozoico. Além dos registros geoquímicos, paleogeográficos e fósseis, nossos estudos implicaram na consideração de forças de atração gravitacional (ver Apêndice A – As Marés.; ver Apêndice D – Variações da distância lunar.) e variações orbitais.

O estudo da atmosfera (O_2 e CO_2) no Fanerozoico permitiu-nos entender a formação das grandes jazidas de carvão, e dos grandes insetos no Permiano, corroborando com nossa hipótese da ampla cobertura oceânica no Paleozoico¹⁹⁵.

Entendemos, pelo dissertado, que o clima no Mesozoico pode ser melhor estudado considerando-se a atual disposição dos continentes. A atual disposição é biogeograficamente compatível com os testemunhos fósseis.

Hoje sabemos que o solo lunar (ver Apêndice C – O regolito da Lua.) é tão fértil quanto nosso *loess*; que a água contida nos minerais trazidos pelo projeto Apollo é isotopicamente idêntica à da Terra; que a densidade lunar é tão compatível com uma perda de núcleo férreo (como proposto por algumas teorias de formação da Lua), quanto com a densidade proveniente, por exemplo, de uma acreção de crosta silicática, posterior à sua formação inicial. A fertilidade do solo lunar para com nossos vegetais exige que essa cobertura tenha ocorrido no Fanerozoico. Nossos estudos sugerem que isso aconteceu no ponto de inflexão entre o Paleozoico e o Mesozoico, o limite Permo-Triássico.

¹⁹⁴ Richard Buckminster Fuller (1895-1983), arquiteto, inventor, interpretador de conceitos geométricos da natureza.

¹⁹⁵ Investimos ainda em algumas leituras para o entendimento de propostas de petróleo abiótico. O interesse aqui foi o de conhecer as propostas de migração do petróleo - e do sal - entre camadas da crosta, o que afeta os métodos atuais para determinação de sua geocronologia, independente da origem.

O alcance destes estudos nos permitirão introduzirmos novas visões, em paralaxe, para discutirmos a produção e a apropriação de conhecimentos sobre evolução do planeta e de seu clima. “Então, isto não será um conteúdo a mais a ser ensinado, e sim um instrumento para ajudar o aluno a compreender a sociedade humana, os mecanismos de produção social e individual de conhecimentos, sua reprodução e técnicas de transformação da natureza”.¹⁹⁶

¹⁹⁶ (CELINO & LEITE, 2001, p.55-56).

5 – CONCLUSÕES.

Existe apenas uma coisa, e o que parece ser uma pluralidade é apenas uma série de aspectos diferentes dessa mesma coisa. A mesma ilusão é produzida em um galeria de espelho e, do mesmo modo, Gaurisankar e o monte Everest acabam por ser o mesmo cume visto de vales diferentes.
Erwin Schrodinger¹⁹⁷

O objetivo desta pesquisa foi o de buscar entender os tempos e eventos que determinaram as grandes mudanças climáticas no Fanerozoico.

Nossa conclusão é a de que nossas hipóteses foram validadas, ou seja:

- A era Paleozoica é compatível com um clima terrestre resultante de uma cobertura oceânica quase total por sobre o planeta.
- O clima Mesozoico-Cenozoico é compatível com os continentes e oceanos ocupando as mesmas posições que hoje.

O ponto de inflexão das duas situações aconteceu o maior evento de extinção, a do Permo-Triássico, e todos os assoalhos basálticos de fundo oceânico possuem data inferior.

Esse conhecimento pode nos ajudar a entender o grau de sensibilidade dos processos geomorfológicos às variações climáticas, que nos permitiria prever o sentido das modificações da dinâmica geomorfológica a uma escala temporal relativamente curta, como a das modificações climáticas globais induzidas pela atividade humana¹⁹⁸.

A cartografia medieval, para demarcar o desconhecido, estampava nas bordas dos mapas a frase latina: *Hic Sunt Dracones*¹⁹⁹. A ciência está sempre à borda do desconhecido.

¹⁹⁷ Erwin Rudolf Josef Alexander Schrodinger (1887-1961), prêmio Nobel em física, ficou famoso também pelo paradoxo do gato numa caixa. Frase colhida em Schrodinger (1944, p.100).

¹⁹⁸ Parágrafo copiado de um artigo (BRUM, 2002).

¹⁹⁹ Aqui há dragões.

6 – REFERÊNCIAS.²⁰⁰

- ARÓSTEGUI, Julio. *A Pesquisa Histórica – Teoria e Método*. Baurú: Edusc, 2006.
- ASHWAL, D.; D. DEMAÏFFE and T. H. TORSVIK. *Petrogenesis of Neoproterozoic Granitoids and Related Rocks from the Seychelles: the Case for an Andean-type Arc Origin*. J. Petrology (2002) 43 (1): 45-83. doi: 10.1093/petrology/43.1.45.
- ATKINS, Peter William. *Reino Periódico – Uma jornada à terra dos elementos químicos*. Oxford University. Rio de Janeiro: Rocco. 1996.
- BACHELARD, Gastón. *O pluralismo coerente da química moderna*. Tradução de Le pluralisme cohérent de la chimie moderne, por Estela dos Santos Abreu. Contraponto: Rio de Janeiro, 2009.
- BAMBURAK, J. D., *Stratigraphy of the Riding Mountain. Boissevain and Turtle Mountain area, Manitoba*. Manitoba Department of Mines, Mineral Resources Division, Geology Survey Rep. 78-2, 47 pp, 1978.
- BECKER, Luann, Robert J. POREDA, A.G. HUNT, T.E. BUNCH, Michael RAMPINO. *Impact Event at the Permian-Triassic Boundary: Evidence from Extraterrestrial Noble Gases in Fullerenes*. Science 291:1530-33. 2001.
- BELOUSOV, Vladimir Vladimirovich. *Basic Problems in Geotectonics*. McGraw-Hill, New York, 1962.
- BERGER, André et al. (eds.). *A Brief History of the Astronomical Theories of Paleoclimates*. In: *Climate Change*, DOI 10.1007/978-3-7091-0973-1_8, # Springer-Verlag Wien. 2012.
- BERNER, Robert A. *The Phanerozoic Carbon Cycle: CO₂ and O₂*. New York: Oxford University, 2004.

²⁰⁰ Estas pesquisas bibliográficas buscaram seguir as linhas da evolução química atmosférica e da reconstituição crustal, por seus valores significativos para observação e interpretação do clima no Fanerozoico. Partimos de livros nos quais se dispuseram a estudar especificamente o assunto (ex-libris Newton M. Campos Jr.) e colecionamos suas citações de outros autores, buscando, quando possível, novos livros e artigos.

- BOWRING, S. "*End-Permian extinction happened in 60,000 years - much faster than earlier estimated, study says.*" Phys. Org. February 10, 2014.
- BRUNHES, Jean. *Geografia Humana*. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1962.
- BURGESS, S. D. et al. *High-precision timeline for Earth's most severe extinction*. Proceedings of the National Academy of Sciences 111:3316-21. 2014.
- CANFIELD, Donald E. *Oxygen - A Four Billion Year History*. Princeton, NJ: Princeton University, 2014.
- CAPO, Rosemary C.; STEWART, Brian W.; CHADWICK, Oliver A. *Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods*. Geoderma, Volume 82, Issues 1-3, Feb 1998, p.197-225. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00102-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00102-X)
- _____ and D. J. DePAOLO. 1990. *Seawater strontium isotopic variations from 2.5 million years ago to present*. Science 249:51-55.
- CATLIN, D. C.; BUICK, R.. *Oxygen and life in the Precambrian*. Geobiology 4:225-226. 2006.
- CELINO, Joil José; LEITE, Osmário Rezende. *A importância das controvérsias geológicas no ensino de geologia: exemplo do Modelo Fixista à Tectônica de Placas*. In Cadernos de Geociências nº 6, UFBA; p.41-58. 2001.
- CHARIG, A. J., *Faunal provinces on land: Evidence based on distribution of fossil tetrapods, with especial reference to the reptiles of the Permian and Mesozoic*, in Middlemiss, F. A., and Rawson, P. F., eds., Faunal Province in Spaces and Time: Liverpool, Seel House Press, p.111-128. 1971.
- CHATERJEE Sankar and HOTTON, Nicolas III, *New Concepts in Global Tectonics*: Lubbock, Texas Tech University Press. 2nd ed. 1992.
- COSGRIFF, J. W, HAMMER, W. R., and RYAN, W. J., *The Pangaeian reptile Lystrosaurus maccaigi*, in the Lower Triassic of Antarctica: Journal of Paleontology, v.56, p. 371-385. 1982.

- CRONIN, Thomas M. *Paleoclimates -Understanding Climate Change Past and Present*. New York: Columbia, 2010.
- CROWLEY, Thomas J.; BURKE, Kevin C. (Eds.). *Tectonic Boundary Conditions for Climate Reconstructions*. New York: Oxford University Press, 1998. Oxford Monographs on Geology and Geophysics no 39.
- DARWIN, Sir George Howard. *The Tides and Kindred Phenomena in the Solar System*. Cambridge Press, 1899.
- DAVIS, William Morris. *Geographical Essays*. Cambridge - USA: Dover Publications, 1954[1909].
- DESSERT, C.; DUPRE, B., GAILLARDET, J., FRANÇOIS, L.M., and ALLEGRE, C.J. *Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle*. Chem. Geol. 202:257-273. 2003.
- DUTRA, Daniel Ruschel, DUCATI, Jorge Ricardo, ROISENBERG, Ari. *Influence of the Moon on Earth's seismic activity* - UFRGS. Boletim Sociedade Astronômica Brasileira, Vol. 27, nº 01, p.285, 2007.
- ERWIN, Douglas H. *Extinction – How Life on Earth Nearly Ended 250 Million Years Ago*. Princeton University, New Jersey - USA, 2008[2006].
- FANG, T.C., XIA, T.L., and LIU, H.L., 1979, *Paleontological stratigraphy*; Beijing, Geological Press, 308 p.
- FARQUHAR, James; SAVARINO, J.; AIRIEAU, S.; THIEMENS, M.H.. *Observation of the wavelength-sensitive mass-dependent sulfur isotope effects during SO₂ photolysis: Implications for the early atmosphere*. Journal of Geophysical Research 106, 32829-32839. 2001.
- FERREIRA, António de Brum. *Variabilidade climática e dinâmica geomorfológica*. Vol. 1, Assoc. Portuguesa de Geomorfólogos, Lisboa, 2002, p.7-15.
- FREUD, Sigmund. *El Malestar en la Cultura y otros ensayos*. Madrid; Alianza Editorial. 2006[1930].

- FURQUIM, S. A. C.; et al. *Soil minerals genesis and distribution in a saline lake landscape of the Pantanal Wetland, Brazil*. In *Geoderma* 154:518-528. 2010.
- GAILLARDET, J., DUPRE, B., LOUVAT, P., and ALLEGRE, C.J., *Global Silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers*. *Chem. Geol.* 159:3-30. 1999.
- GINGERICH, Owen. *O Livro que ninguém leu - Em busca das revoluções de Nicolau Copérnico*. Record - São Paulo, 2008 [2004].
- GOLDICH, Samuel S. *A study in rock weathering*. *J. Geol.* 46:17-58. 1938.
- GU Zhiwei, SHA Jingeng, LI Zishun, and YU Jinshan. *Occurrence of marine Jurassic bivalves in eastern Northeast China and its significance on the non-marine Jurassic-Cretaceous boundary in east and central Asia*, in Su Zongwei, ed., *Contribution to 17th International Geological Congress, 1984, Moscow: Beijing, Science Press, Developments in Geoscience*, p.111-118. 1984.
- HALLAM, Anthony. *De la Deriva de los Continentes a la Tectónica de Placas*. Barcelona: Labor, 1976.
- _____. *Grandes Controversias Geológicas*. Barcelona: Labor, 1985.
- _____. *Phanerozoic Sea-Level Changes*. New York: Columbia University, 1992.
- _____. *Catastrophes and lesser calamities – The causes of mass extinction*. Oxford University: Oxford UK, 2004.
- HARDIE, L.A., *The roles of rifting and hydrothermal CaCl₂ brines in the origin of potash evaporites: An hypothesis*, *American Journal of Science*: v. 290, p. 1-42. 1990.
- _____, *On the significance of evaporites*: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*: v. 19, p. 131-168. 1991.
- HESSE, P. P. and G. H. McTAINSH. *Last glacial maximum to early Holocene wind strength in the mid-latitudes of the southern hemisphere from aeolian dust in the Tasman Sea*. *Quaternary Research* 52:343-349. 1999.

- KALANDADZE, N. N.; *Pervaya nakhoda lystrozava na territorii evropeyskoy chasti SSSR: Paleontologicheskii Zhurnal*, no.4, p.140-142. 1975.
- _____ and RAUTIAN, A. S.; Mesto Tsentralnoy Azii v zoogeograficheskoy istorii Mesozoya, in Barsbold, R. Vorob'yeva, E. I., Lubsandanzan, B. et al. (eds.), *Iskopayemyye repitilii Mongolii: Moscow, Sovetsko-Mongol'skaya Paleontologicheskaya Ekspeditsiya, Trudy*, v.24, p.6-44. 1983.
- KEITH, MacKenzie L. *Evidence for a plate tectonics debate*. Pennsylvania: Elsevier, 2001. In: *Earth-Science Reviews*, 55, p.235-336.
- KNOLL, A. H.. *Life in a young planet: the first 3 billion years of evolution on Earth*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2003.
- IMBRIE, J. , E. Boyle, S. Clemens et al. *On the structure and origin of major glaciation cycle, 1. Linear responses to Milankovitch forcing*. *Paleoceanography*, 7:701-738. 1992.
- _____, A. Berger, E. Boyle et al. *On the structure and origin of major glaciation cycle, 2. The 100,000-year cycle*. *Paleoceanography*, 8:699-735. 1993.
- JEFFREYS, Harold. Sir. *The Earth - Its origin, history and physical constitution*. Cambridge, UK: Oxford University, 1976[1929].
- KIRSCHVINK, J.; RIPPERDAN, R.; EVANS, D. *Evidence for a Large Scale Reorganization of Early Cambrian Continental Masses by Inertial Interchange True Polar Wander*. *Science*, 277:541-45. 1997.
- LEIBNIZ, Gottfried Wilhelm. *Protogaea – 1749*. Trad. Nelson Papavero, Dante Martins Teixeira e Maurício de Carvalho Ramos. São Paulo: Editora Plêiade, 1997.
- LOWE, Donald R. *Abiological origin of described stromatolites older than 3.2 Ga*. *Geology*. 22:387-90. May 1994.
- MACLAREN, C. *The glacial theory of Professor Agassiz of Neuchatel*. *American Journal of Science*. 42:346-365. 1842.

- MALOOF, A. C, et al. *Combined Paleomagnetic, Isotopic, and Stratigraphic Evidence for True Polar Wander from the Neoproterozoic. Akademikerbreen Group, Svalbard, Norway*. Geological Society of America Bulletin, 118:1099-124. 2006.
- MARUYAMA, Shigenori. *Aquecimento Global?* Tradução Kenitiro Suguio. Oficina de Textos, SP, 2009.
- MASON, Brian Harold; MELSON, William G. *The Lunar Rocks*. John Wiley & Sons, 1970.
- MATSAS, George; VANZELLA, Daniel. *Buracos Negros - Rompendo os limites da ficção*. Rio de Janeiro: Vieira&Lent, 2008.
- McCULLY, James Greig. *Beyond the Moon – a conversational, common sense guide to understanding the tides*. London: World Scientific, 2013.
- McELHINNY, Michael W.; McFADDEN, Phillip L. *Paleomagnetism – Continents and Oceans*. Sydney – Australia: Academic Press, 2000.
- MEDIAVILLA PÉREZ, María Jesús. *La Atmósfera, Materia y Radiación*. Madrid: Sirius, 2004.
- MELOSH, H. J. *Impact Cratering: a geologic process*. New York: Oxford, 1996.
- MEYERHOFF, Arthur Augustus; BOUCOT, Arthur J.; HULL, Donna Meyerhoff; DICKINS, J. M.. *Phanerozoic Faunal and Floral Realms of the Earth – The intercalary relations of the Malvinokaffric and Gondwana faunal realms with the Tethyan faunal realm*. Geological Society of America GSA Memoirs 1996, v. 189, p. 1-69 doi:10.1130/0-8137-1189-4.1
- MILLER, Ken G., G. S. KOMINZ, J. V. BROWNING, et al. *The Phanerozoic record of global sea-level change*. Science 312:1293-1298. 2005.
- MITCHELL, R. N. *True Polar Wander and supercontinent cycles: implications for lithospheric elasticity and the triaxial Earth*. American Journal of Science 314:966-78. 2014.

- MOHRIAK et al. *Geological and geophysical interpretation of the Rio Grande Rise, south-eastern Brazilian margin: extensional tectonics and rifting of continental and oceanic crusts*. Petroleum Geoscience, Vol. 16, p. 231-245. 2010.
- O HOBBS, J.E.; LINDESAY, J.A.; BRIDGMAN, H.A. (Eds.). *Climates of the Southern Continents - Present, Past and Future*. Chichester – UK: Wiley, 1998.
- OGG, James G., OGG, Gabi M., GRADSTEIN, Felix M., *A concise geologic time scale 2016*. Elsevier, 2016, p.3.
- OLSEN, Steffen M.; HANSEN, Bogi; QUADFASEL, Detlef; ØSTERHUS, Svein. *Observed and modelled stability of overflow across the Greenland–Scotland ridge*. Nature 455, 519-522. 2008. doi:10.1038/nature07302.
- ÖPIK, Ernst Julius. *Tidal deformations and the origin of the Moon*. The Astronomy Journal, 1961, vol. 66, 2nd, p. 60-67.
- ORESQUES, Naomi (ed.). *Plate Tectonics, an insider's history of the modern theory of the Earth*. Boulder – Colorado: Westview Press, 2003.
- OZIMA, Minoru. *Geo História - A Evolução Global da Terra*. Brasília: UNB, 1991.
- PAGANI, Mark; James C. Zachos, et al. *Marked Decline in Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations During the Paleogene*. Science vol. 309, Issue 5734, 600-603. 2005. <http://people.earth.yale.edu/cenozoic-evolution-carbon-dioxide>.
- PAYNE-GAPOSCHKIN, Cecilia. *The Galactic Novae*. North-Holland, 1957.
- PEIRCE, Charles Sanders. *The Fixation of Belief*. P107: Popular Science Monthly 12-November 1877: 1-15, apud Writings of Charles Sanders Peirce, 1872-1878, vol. 3, Indiana University, 1986, p.242-257.
- PEREIRA, Flávio Augusto. *Astrobiologia - Vida no Cosmos*. São Paulo: Traço Editora, 1980 [1958].
- POSTGATE, J.R. *The sulphate-reducing bacteria*. 2nd ed. Cambridge University Press, New York, 1979.

- RAMOS, Cátia Larissa Santos. *Avaliação da cinética de redução microbiológica de sulfato*. Dissertação (Mestrado). Instituto Ciência da Saúde, Univ. Federal da Bahia, 2013.
- REA, D. K. *The paleoclimate record provided by aeolian deposition in the deep sea: The geologic history of wind*. Reviews of Geophysics 32:159-195, 1994.
- REUFER, Andreas, Meier, Matthias M. M., Benz, Willy & Wieler, Rainer. *A hit-and-run giant impact scenario*. Icarus 221, 296–299, 2012.
- ROCHE, Edouard. *Essai sur la constitution et l'origine du Système Solaire*. Paris: Gauthier-Villars, 1873.
- SAGAN, Carl; CHYBA, C.. *The early faint sun paradox: Organic shielding of ultraviolet-labile greenhouse gases*. Science 276:1217-1221, 1997.
- SAMYLINA, V.A. and YEFIMOVA, A.F., *Pervyye nakhodki ranneyurskoy flory v basseynе r. Kolyma: Doklady Akademia Nauk SSSR*, v.179, no.1, p.166-168, 1968.
- SAUTU, Ruth; BONIOLO, Paula; DALLE, Pablo; ELBERT, Rodolfo. *Manual de Metodología*. Buenos Aires: Clacso Libros, 2005.
- SCOTese, Christopher and J. GOLONKA, *Paleomap Paleogeographic Atlas*, Department of Geology, University of Texas at Arlington, 1992.
- SCHRODINGER, Erwin Rudolf Josef Alexander (Nobel de Física). *O que é vida - O aspecto físico da célula viva*. UNESP, 1997[1944].
- SHACKLETON, N. J., A. BERGER and W. R. PELTIER. *An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677*. Transactions of the Royal Society of Edinburgh. 81:251-261, 1990.
- SKINNER, Brian J.; PORTER, Stephen C. *The Dynamic Earth - An Introduction to Physical Geology*. New York: IE-Wiley, 2003.
- SMILEY, Charles, J. *Paleofloras, faunas and continental drift: some problems areas*: In CHATERJEE Sankar and HOTTON, Nicolas III, *New Concepts in Global Tectonics*: Lubbock, Texas Tech University Press. 2nd ed. 1992, p. 241-258.

- SUN Ailin, [Sun A. L.], *Permo-Triassic reptiles of Sinkiang*: Scientia Sinica, 16, p. 152-156, 1973.
- TANG, K.; BASKARAN, V.; NEMATİ, M. *Bacteria of the sulphur cycle: An overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries*. Biochemical Engineering Journal v. 44, p. 73–94, 2009.
- TARIFA, José Roberto; Azevedo, TARIK Rezende de. *Os Climats na Cidade de São Paulo - teoria e prática*. São Paulo: Geousp, 2001.
- TAYLOR, Frank Bursley. *The Planetary System - A study of its structure and growth*. Forgotten Books, 2012 [1903].
- TEIXEIRA, W., TOLEDO, M. C. M., FAIRCHILD, T. R., TAIOLI, Fábio. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.
- TORSVIK, et al. (Trond H. Torsvik; Hans Amundsen; Ebbe H. Hartz; Fernando Corfu; Nick Kusznir; Carmen Gaina; Pavel V. Doubrovine; Bernhard Steinberger; Lewis D. Ashwal & Bjørn Jamtveit.) *A Precambrian microcontinent in the Indian Ocean*. Nature Geoscience 6, 223–227 (2013) doi:10.1038/ngeo1736.
- TORSVIK et al. (Trond H. Torsvik, Hans E. F. Amundsen, Reidar G. Trønnes, Pavel V. Doubrovine, Carmen Gaina, Nick J. Kusznir, Bernhard Steinberger, Fernando Corfu, Lewis D. Ashwal, William L. Griffin, Stephanie C. Werner, Bjørn Jamtveit.) *Continental crust beneath southeast Iceland*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015; 201423099 doi:10.1073/pnas.1423099112
- VAN ANDEL, Tjeerd H. *New Views on an Old Planet*. Cambridge University, USA, 1995.
- VAN DER ELST, Nicholas J., DELOREY, Andrew A., SHELLY, David R., and JOHNSON, Paul A. *Fortnightly modulation of San Andreas tremor and low-frequency earthquakes*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, vol. 113 no. 31, 8601–8605, doi: 0.1073/pnas.1524316113, 2016.
- VEIZER, J., D. Ala, K. Azmy, et al. *^{87}Sr , ^{13}C e ^{18}O evolution of Phanerozoic seawater*. Chemical Geology 161:59-88, 1999.

- VEEVERS, J. J. *Gondwanaland from 650-500 Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185-100 Ma breakup: Supercontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating*. Earth-Science Reviews 68:1-132, 2004.
- VERNADSKY, Vladimir Ivanovich (1863-1945). *La Biosfera*. Madrid: Fundación Argentaria, 1997 [1926].
- VOZENIN-SERRA, *État de nos connaissances sur les flores de Paléozoïque supérieur et du Mésozoïque du sud-est asiatique. Interpretacions paleogeographiques: Société Géologique de France Mémoire*, n.s., no.147, p.169-181, 1984.
- WARD, Peter Douglas; KIRSCHVINK, Joseph. *A New History of Life - The radical new discoveries about the origins and evolution of life on Earth*. New York: Bloomsbury, 2015.
- WEGENER, Alfred Lothar. *El Origen de los Continentes y Océanos*. Barcelona: Crítica, 2009 [1924].
- WEINER, Jonathan. *O Bico do Tentilhão – Uma história na evolução no nosso tempo*. Trad. Talita M. Rodrigues. Rio de Janeiro: Rocco, 1995.
- WHITTLESEY, C. *Depression of the ocean during the ice period*. American Association for the Advancement of Science Proceedings. 16:92-97, 1968.
- WILLIAMSON, Iain Ashworth. *Coal Mining Geology*. London: Oxford University Press, 1967.
- WINCHESTER, Simon. *O Mapa que Mudou o Mundo - William Smith e o nascimento da geologia moderna*. Trad. Suyan Marcondes Osborn. Rio de Janeiro: Record, 2004.
- ZHANG Lujin, *On the character of Permian microflora in the Junggar basin of Xinjiang: Paleontologia Cathayana*, no. 1, p. 327-365, 1983.
- ZIMINA, V.G., *O Glossopteris i Gangamopteris iz permskikh otlo zheniy yuzhnogo Primor'ya [Glossopteris and Gangamopteris from the Permian depositis of the south Maritime Territory]: Paleontologicheskii: Zhurnal*, no. 2, p. 113-121, 1967.

APÊNDICE A – As Marés.

O mais novo e maior acelerador e colisor de partículas Franco-Suíço (Large Hadron Collider - LHC) é um túnel circular com 5 milhas de diâmetro. De modo a interpretar o resultado da colisão de partículas subatômicas, a circunferência do túnel deve possuir uma precisão de 1 milímetro. Como a Suíça sobe e desce cerca de 250 milímetros em alguns ciclos lunares, "as dimensões do túnel eram deformadas e os resultados confusos" (McCULLY, 2013, p.57). A organização tem vinte Estados membros e em 2010 tinha um efetivo de aproximadamente 2.400 funcionários em tempo integral assim como mais de 11.000 cientistas e engenheiros (representando 580 universidades e centros de pesquisa e 80 nacionalidades). Ainda assim, esqueceram das marés. O acelerador ficou mais de um ano parado para acertos e reprogramação.

Um modelo puramente harmônico para previsão de marés oceânicas, desenvolvido por Arthur Doodson²⁰¹, é o mais comumente utilizado nas décadas recentes. "Ele explica as marés como a soma de um número finito de constituintes senoidais, independentes, simultâneos, com frequência determinada por forças astronômicas, e as amplitudes resultantes dos efeitos da oceanografia, da hidráulica de águas rasas e da geografia da costa" (id, p.7).

No cálculo das tábuas de marés fornecida anualmente aos navegantes, o National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) inclui 37 maiores constituintes independentes que possuem uma influência mensurável nas marés terrestres. "Os computadores da armada norte-americana são programados com 114 variáveis independentes que influenciam as marés. De acordo com Arthur Doodson, o total de variáveis seria de 396" (id., p.11).

As marés são determinísticas, governadas por forças conhecidas e previsíveis. Mas elas não são totalmente previsíveis. E por que não podemos eliminar totalmente a imprevisibilidade do sistema? Por causa de um princípio que é o mantra dos teóricos do caos: "Todo sistema natural complexo é altamente dependente de suas condições iniciais". Não importa por onde você comece, suas conclusões poderão ser diferentes, se você iniciar a mensuração do sistema num ponto anterior no tempo. "Essa é a razão pela qual o nível do mar precisa ser reavaliado a cada 25 anos. Porque as condições iniciais de qualquer estudo mudam

²⁰¹ Oceanógrafo do Dia-D da invasão da Normandia, na 2ª Guerra Mundial.

quando você volta no tempo, infinitamente; é literalmente impossível eliminar algum grau de imprevisibilidade num estudo científico de natureza sempre cambiante" (McCULLY, 2013, p.176).

As marés em São Luís - MA (lat. 2,5°S) variam cerca de 500 cm diariamente. Em Laguna - SC (lat. 28,5°S) a variação não costuma passar de 25 cm. Não podemos pensar diretamente na latitude. Na Antártida, com latitudes acima de 80°S, a variação entre a maré alta e a baixa também é similar à de Laguna. E na Baía de Fundy, Canadá, a 45°N, a maré pode variar mais de 1.500 cm (15 m) diariamente.

Figura 33 - Mapa do constituinte semidiurno das marés e dos pontos anfdrômicos

O constituinte M2 (semidiurno) das marés, com a amplitude indicada por cores. As linhas brancas são isolinhas de marés espaçadas por intervalos de fase de 30° (um pouco mais de uma hora). Os pontos anfdrômicos são as áreas em azul escuro onde as linhas se encontram. Autoria: R. Ray (NASA) ²⁰²

Desde o final do século XIX, oceanógrafos começaram a medir sistematicamente o caminho das ondas de marés através dos oceanos (ver Figura 33). Cada isolinha de maré

²⁰² Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Amphidromic_point#/media/File:M2_tidal_constituent.jpg Acesso em: 29/2/2016.

conecta pontos onde a maré alta chega simultaneamente. "A esses sistemas circulares de movimento das ondas de marés eles deram o nome de *amphidrome*, da palavra Grega para pista circular de corrida" (McCULLY, 2013, p.73). Os pontos anfidrômicos são aqueles que a maré oceânica não se pronuncia; a diferença entre a elevação do oceano e a elevação da crosta se anula.²⁰³

As mais graves dificuldades no problema completo das marés não surgem no caso especial que foi considerado por Newton. "Seu modelo era o de um mar confinada a um canal que circunda o equador, e que Lua e Sol se moviam exatamente no equador" (DARWIN, 1898204, p.167). Assim, não podemos nos satisfazer quando, ao discutir a razão da existência, com alguma simetria, de maré simultânea nos dois lados do planeta, as pessoas respondam com as equações diferenciais de Newton, uma vez que seus resultados foram obtidos num modelo ruim, com toda a água do planeta confinada em um pneu com 5 milhas de diâmetro em torno do Equador.

A complexidade do sistema de marés é que o torna estável; ou seja, se alguns dos fatores se modificam, não afetam o todo, com muito mais dependências. As marés são grandemente dependentes da geografia e da topografia. O nível do mar é um monte de coisas, mas não é nível.

²⁰³ Isso seria possível, por exemplo, caso a crosta fosse, nessas regiões, fina o suficiente para sofrer atração juntamente com o oceano, mas esta afirmativa não foi encontrada em nossas leituras.

²⁰⁴ A mathematical argument is, after all, only organized common sense, and it is well that men of science should not always expound their work to the few behind a veil of technical language, but should from time to time explain to a larger public the reasoning which lies behind their mathematical notation.

APÊNDICE B - O limite de Roche.

Em 1994, a comunidade científica observou o estilhaçamento do cometa Shoemaker-Levy-9 (ver Figura 34), que entrou na órbita de Júpiter anos antes, e que implodiu ao se aproximar demais do planeta. Quanto é "aproximar-se demais"? Edouard Albert Roche (1820-1883) calculou o quanto era isso em 1873, publicado em seu "Essai sur la Constitution et l'Origine du Système Solaire"²⁰⁵.

Figura 34 - Choque do cometa Shoemaker-Levy-9 com Júpiter, após implodir em órbita

²⁰⁶.

Roche foi discípulo e colaborador do matemático e astrônomo Pierre Simon, o Marquês de Laplace (1749-1827). Laplace organizou, resumiu e ampliou o estudo geométrico da mecânica clássica de Isaac Newton (1643-1727). Além de nos deixar a equação de Laplace²⁰⁷, a transformada de Laplace²⁰⁸ e o operador diferencial de Laplace²⁰⁹, ele também adicionou variáveis (profundidades, especificidades da costa etc.) e críticas em relação aos estudos de Newton sobre o fluxo e o refluxo dos oceanos.

²⁰⁵ Ensaio sobre a constituição e a origem do sistema solar.

²⁰⁶ Fonte da ilustração: http://geoinfo.amu.edu.pl/wpk/rst/rst/Sect19/Sect19_23.html, Acesso em 14/01/2017.

²⁰⁷ Equação diferencial elíptica descritora modelar de comportamentos em astronomia, eletromagnetismo, mecânica dos fluidos, formulando-lhes as funções potencial gravitacional, elétrica, fluídica, entre outras.

²⁰⁸ A transformada de Laplace é um método operacional de resolução de problemas de valor inicial que permite levar a resolução de equações diferenciais à resolução de equações polinomiais, mais simples de resolver.

²⁰⁹ O operador de Laplace-Beltrami pode ser generalizado para operar em funções definidas em superfícies no espaço euclidiano, em geometria diferencial.

Edouard Roche deu continuidade aos estudos de Laplace, não só confirmando as ideias de formação de anéis planetários a partir da implosão de satélites, como também calculando a que distância isto ocorreria²¹⁰, distância esta chamada de "limite de Roche". O comportamento e formulações da aproximação entre dois corpos celestes homogêneos foi divulgado (ROCHE²¹¹, 1873) em meio aos estudos da formação do sistema solar.

O princípio físico que rege o limite de Roche fundamenta-se na força gravitacional (ver Figura 35). Quando um sistema de menor densidade, por exemplo, uma lua, aproxima-se demasiadamente de um sistema de maior densidade, a força gravitacional exercida pelo corpo de maior densidade passa a absorver matéria do corpo de menor densidade. A aceleração da gravidade torna-se negativa na superfície alinhada na direção do sistema de maior densidade fazendo-o desintegrar-se progressivamente. Esse fenômeno é conhecido como forças de maré agindo no sistema de menor densidade.

Figura 35 - Sequência de desenhos representativos do Limite de Roche

Entrada em órbita: alongamento em direção ao corpo de maior densidade; atingimento da distância limite; desintegração ante as forças de maré; nuvem de fragmentos²¹².

O limite de Roche pode ser aplicado principalmente a luas em torno de um planeta²¹³, e sua formulação é dada por:

$$d = (2,44 \cdot \rho_M / \rho_m)^{1/3} \cdot R .$$

²¹⁰ Ver <http://astro.if.ufrgs.br/fordif/node7.htm>.

²¹¹ Études sur la figure des corps célestes et sur la disposition de couches de niveau dans les atmosphères qui les entourent, précisent ou modifient la théorie cosmogonique de Laplace.

²¹² Ilustração em <http://wordpress.mrreid.org/2013/04/18/the-roche-limit-and-planetary-rings/>.

²¹³ Efeitos semelhantes, como o Lóbulos de Roche aplicam-se a estrelas binárias muito próximas, onde há transferência de matéria de uma estrela para outra e na colisão de galáxias, onde uma galáxia aprisiona estrelas da outra galáxia.

Onde: d é a distância mínima do corpo secundário (rígido) antes de desintegrar-se;
 ρ_M é a densidade do corpo principal (maior densidade);
 ρ_m é a densidade do corpo secundário;
 R é o raio do corpo principal.
 $2,44$ é uma constante inversamente proporcional à rigidez do satélite.²¹⁴

Em 1974, Hans R. Aggarwal e Vern R. Oberbeck (Astrophysical Journal, 191, p.577), da NASA, estudaram o caso de ruptura por maré de corpos esferoidais sólidos, rochosos ou gelados, mantidos coesos por forças de tensão intrínsecas de seu material. Confirmando Roche, encontraram que, para satélites desse tipo, com diâmetros maiores do que 40 km, a distância mínima que eles podem chegar de seu planeta sem quebrar é:

$$d = (1,38 \cdot \rho_M / \rho_m)^{1/3} \cdot R .$$

Tais cálculos e formulações consideravam que o interior da Terra era homogêneo, mas hoje sabemos que existem fases líquidas ao menos sob a crosta (descontinuidade de Moho) e no núcleo externo. Podemos então considerar que, caso a órbita lunar se aproximasse da Terra, a Lua seria estilhaçada (colapsaria por forças gravitacionais de marés) quando chegasse a uma distância entre 9 mil e 19 mil km de nosso planeta (ver Tabela 13). A distância média atual entre Terra e Lua é de 384 mil km.

Tabela 13 - Massa e volume considerados em cálculo do Limite de Roche

Corpo	Massa (kg)	Raio (m)	Densidade (kg/m ³)
Terra	5,970E+24	6,370E+06	5,514E+03
Lua	7,350E+22	1,738E+06	3,342E+03

Dados considerados para nossos cálculos. Tabela elaborada pelo autor.

Hoje, mesmo na distância atual, a crosta terrestre sente as forças de maré. Que aconteceria com a crosta da Terra, no caso de uma brutal aproximação da Lua? Será que a crosta terrestre entraria em colapso antes que a Lua o fizesse? Será que a crosta terrestre entrou em colapso diante de uma aproximação lunar no Permo-Triássico?

Se a Lua se aproximasse até cerca de 9.000 km da Terra, a Lua colapsaria por forças gravitacionais de marés. Entretanto, bastaria que ela se aproximasse bem menos para que

²¹⁴ Pode diminuir até 1,38 para corpos perfeitamente rígidos.

entrasse em colapso o elo mais fraco entre Terra e Lua. Esse elo mais fraco é a crosta da Terra.

Figura 36 - Imagem de colapso de crosta planetária.²¹⁵

A aproximação até 30.000 km entre Terra e Lua (ÖPIK, 1961) provocaria o colapso da crosta terrestre? (ver Figura 36). Teria sido esse - de aproximação lunar - o evento que fez a Terra perder parte de sua crosta e deixou os continentes na posição em que estão atualmente? Artigos recentes, como o de Reufer (2012²¹⁶), usam modelos para um bater-e-correr, como um resvalar em baixa velocidade, o que forneceria à Lua a velocidade de escape necessária para se iniciasse o distanciamento atual.

²¹⁵ <https://br.pinterest.com/wonkypolygons/john-harris/>

²¹⁶ Ver artigo completo em <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1207/1207.5224.pdf>.

APÊNDICE C – O regolito²¹⁷ da Lua.

Diferenciação²¹⁸, fissão²¹⁹, fragmentação²²⁰, coalescência²²¹, colisão²²², captura²²³, são algumas das teorias de formação da Lua. Todas essas e outras teorias de formação da Lua possuem uma característica em comum: todas interagem fortemente com a Terra. Estudar a formação e evolução da Lua é essencial para entendimento da formação e evolução de nosso planeta, da nossa crosta, de nosso relevo, dos continentes e oceanos, das marés, dos pontos anfidrômicos²²⁴, dos movimentos de massa, da acomodação crustal, e dos terremotos.

Os minerais trazidos da Lua por naves e astronautas mostram que elementos dali são isotopicamente similares aos da crosta da Terra. Comparativamente à Terra, a cobertura da Lua é desprovida dos elementos voláteis e deficitária em elementos siderófilos. Isso vem sendo comprovado regularmente, com a evolução dos novos equipamentos e técnicas. Até as hidroxilas (HO) da Lua são isotopicamente iguais às da Terra. Assim, podemos entender que, ou as coberturas de Terra e Lua foram feitas juntas, ou a Lua, depois de formada, foi recoberta por material extraído da crosta continental terrestre. Mas, para essa segunda hipótese, seria necessário estar faltando crosta terrestre. E está faltando. Olhamos para o globo terrestre e vemos que estão faltando 2/3 da crosta continental. E que a crosta mais nova, basáltica, chamada oceânica por se apresentar a menor altitude, sob os oceanos, tem menos de 250 milhões de anos.

A evolução e distância da Lua estão intimamente ligados à morfologia da Terra. O estudo da origem dos continentes e dos oceanos nos leva às forças gravitacionais, principalmente da Lua e do Sol. A Lua orbita a Terra em rotação síncrona. Tecnicamente se diz que ela está em órbita ressonante na razão 1:1, e que isso ocorreu em função da ação da maré que a atração gravitacional da Terra exerce sobre a Lua. O estudo da evolução da Lua e do regolito lunar nos remete à formação dos continentes e oceanos terrestres (ver Figura 37).

²¹⁷ Regolito é o material solto, desde grandes blocos até pó finíssimo, que cobre uma rocha sólida capeia as rochas sãs e que é decorrente da erosão por bombardeio meteorítico, inconsolidado, composto por fragmentos de rocha e solo, incluindo solo transportado, solo autóctone, depósitos residuais.

²¹⁸ Formação conjunta de Terra e Lua, a partir de um disco primordial de gás e poeira. O material mais leve ficou na borda do disco e formou a Lua. Mas, de onde viria o momento angular do conjunto?

²¹⁹ Teoria de ejeção de material terrestre; George Darwin (1892), Otto Ampherer (1925). De onde viria tal força?

²²⁰ Um planeta maior teria sido fragmentado em partes: Terra, a Lua e Marte. Carece de fundamentação teórica.

²²¹ Acreção conjunta de planetesimais, formando Terra e Lua, simultaneamente. E as densidades distintas?

²²² Impacto há mais de 4 bilhões de anos fez com que uma enorme massa de material planetário fosse separada da Terra, que se aglutinou para formar nosso satélite.

²²³ Lua teria sido formada em algum lugar do Sistema Solar e sido capturada pelo campo gravitacional da Terra.

²²⁴ Pontos na superfície planetária em que a maré oceânica se anula.

Figura 37 - Mapa da idade geológica das crostas continentais

O mapa apresenta as idades das crostas ditas continentais. Todo o restante da cobertura terrestre (em branco) é do Mesozoico-Cenozoico (< 250 Ma).²²⁵

O regolito lunar consiste de partícula finas, frequentemente referido como "solo" lunar. As rochas trazidas pelas naves Apollo foram prontamente investigadas por cientistas de todo o mundo. Minúsculas esferas vítreas, normas em vulcões e em crateras de impacto terrestre, são encontradas na superfície lunar. "São altamente reativos e, em contato com água, prontamente liberam nutrientes inorgânicos necessários às plantas" (MASON, 1970²²⁶, p.92), conferindo ao solo lunar uma característica de alta fertilidade para plantas terrestres. O solo terrestre é produto de um complexo de reações orgânicas e inorgânicas desconhecidas na Lua. Como pode ser o solo lunar tão fértil para a vegetação terrestre?

²²⁵ Disponível em <http://www.d.umn.edu/~mille066/Teaching/EST13.html>.

²²⁶ This book describes the investigation of samples collected on the Moon by the Apollo missions, comparing them with meteoritic and terrestrial mineralogy, chemistry, structure and abundances.

Em 1969 uma das rochas trazidas pela Apollo 11 foi doada ao governo holandês (ver Figura 38). Em 2006, ao ser submetida a testes modernos, concluiu-se que esta rocha era um fóssil vegetal e, portanto, de origem terrestre; ao menos este exemplar de rocha tinha origem terrestre. A NASA considera que 2% das rochas trazidas da Lua podiam ter origem extra lunar.

Figura 38 - Fóssil vegetal coletado na superfície lunar²²⁷.

Consideremos, como sugeriram Kant e Laplace, que a Terra tenha sido formada pela agregação de planetesimais, há uns 4.500 Ma. O calor gerado pelos choques elevou a temperatura a ponto de dissolver as rochas e permitir que ocorresse uma diferenciação parcial de seu interior. Por convecção, os elementos mais pesados foram convergindo ao interior, e os mais leves à superfície. A superfície resultou em uma camada silicática, cerâmica, cobrindo a totalidade do planeta. A crosta cerâmica terrestre, refratária ao calor, reteve e concentrou o calor interno, produzindo uma região super aquecida. Esta região subcrustal super aquecida torna-se uma camada liquefeita de magma ainda existente: a descontinuidade de Mohorovicic ou Moho. É esta descontinuidade que confere um grau de liberdade à crosta, tal e qual a de nossa pele, que pode enrugar-se e mover-se com bastante independência em relação aos músculos e ossos.

²²⁷ Fonte: <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/8226075.stm>. Acesso em 15 de agosto de 2017.

A Lua deve ter nascido, por agregação planetesimal, na mesma época que a Terra, com ambos os corpos girando em torno do centro de massa do binário Terra-Lua. Pelo estudo da distribuição da densidade no interior lunar, o proeminente astrônomo Ernst Öpik conclui que "o processo de constituição da massa principal da Lua foi distinto do que produziu as características de sua superfície" (ÖPIK, 1961, p.67).

Na “pele” da Terra – a crosta – desenvolve-se a biosfera, intimamente relacionada à vida, ao solo, à atmosfera. Vida, solo e atmosfera resultam de interação e persistência. "A molécula de nitrogênio N_2 possui uma extraordinária estabilidade química. O tempo médio de residência na atmosfera é de 1.300 milhões de anos, enquanto o CO_2 ou a maior parte dos contaminantes se contam em poucos anos, meses ou dias" (MEDIIVILLA, 2004, p.60). Em termos de O_2 , muitos cientistas pensam que a combustão florestal é o modo com que a Terra regula o oxigênio atmosférico. Nas palavras de James Lovelock: “por baixo de uns 15% (de oxigênio) nada arderia; por cima de uns 25% a combustão é instantânea e os incêndios destruiriam todos os bosques” (apud MEDIIVILLA, 2004, p.63). As florestas como as do Carbonífero, com mais de 30% da atmosfera sendo oxigênio, poderiam ser constituídas e não arderiam se estivessem em ambiente aquático. Muita água, permitindo muita fotossíntese, e muita liberação de oxigênio.

A vida na Terra, tal qual a conhecemos hoje, foi constituída no Fanerozoico, ou seja, nos últimos 540 milhões de anos. A fertilidade do solo terrestre é recente – produzida no Fanerozoico – e proveniente da persistência da biosfera terrestre. Essa fertilidade para plantas terrestres encontrada no regolito da Lua, corrobora com as conclusões de que "as características da superfície lunar são distintas da formação da massa principal" (ÖPIK, 1961, p.67).

O hélio-4 (muito frequente) e o neon-21 se formam a partir da decomposição de isótopos de urânio e tório, enquanto o argônio-40 é do potássio-40. "O hélio mantém uma concentração constante desde milhões de anos, já que se perde continuamente ao espaço; o argônio é muito mais pesado e fica preso na atmosfera, de modo que sua quantidade aumenta no transcurso do tempo" (MEDIIVILLA, 2004, p.74).

O estudo do hélio retido das rochas parece importante para avaliação de vinculação entre o regolito terrestre e o lunar. O átomo de hélio-4²²⁸ (4He) é o isótopo mais comum de

²²⁸ Contém dois prótons, dois nêutrons e dois elétrons.

hélio, sendo produzido na Terra por decaimento alfa de elementos radioativos pesados; as partículas alfa que surgem são íons de núcleos ^4He . O ^4He foi formado em enormes quantidades durante nucleossíntese do Big Bang²²⁹. O hélio terrestre é composto quase exclusivamente (99,99986%) pelo isótopo ^4He .

Existe apenas uma pequena quantidade de hélio-3²³⁰ (^3He) na Terra (0.000137%), presente desde a formação do planeta. Quantidades menores são produzidas pelo decaimento beta do trítio. No entanto, em estrelas, o ^3He é mais abundante, pois é um produto de fusão nuclear. Apesar de o ^3He ser aproximadamente dez mil vezes mais raro que o ^4He na Terra, a sua presença significativa em depósitos de gás subterrâneos implicou que ele não se deteriorasse ou que tivesse um tempo de vida semelhante à do isótopo primordial. Seria esse ^3He do subsolo terrestre o que está presente no regolito lunar?

Imaginemos que, no Mesozoico, a Lua tenha se afastado em órbita espiral divergente. Simultaneamente ao afastamento, a Lua teria sido recoberta por estilhaços e poeira silicática que arrastou da crosta da Terra. Tal material teria aumentado o raio lunar em 300 km, que passaria a ter o raio e a densidade atuais. Os choques dos estilhaços provocariam milhares de crateras e anomalias gravimétricas na superfície lunar próxima. Do outro lado, protuberância antipodais. Segundo os cálculos de Ernst Öpik (1961), as crateras lunares aconteceram entre 30 e 50 mil km de distância da Terra (ver Apêndice D – Variações da distância lunar.), com a acreção final a 200 mil km da Terra. Hoje a Lua está a 384 mil km.

Com uso de amplas bases de dados, cientistas comprovaram o aumento de atividades sísmicas na falha de San Andreas, não apenas quando a Lua, nas fases nova e cheia, cruza o meridiano sobre o local afetado, mas principalmente quando a amplitude da maré excede o valor da amplitude prévia (VAN DER ELST et al., 2016). A água que penetra por fissuras nas áreas de fragilidade crustal acabam por provocar solução e desabamento em arenitos e loesitos: movimentos de massa no interior do planeta, ou acomodação crustal, ou seja, terremotos. Quando este desabamento afeta o fundo oceânico, um grande tsunami se forma (ver Figura 39).

²²⁹ Teoria cosmológica que considera que o Universo surgiu a partir de uma grande explosão num tempo finito, a partir das constatações de resfriamento e expansão deste Universo.

²³⁰ Contém dois prótons, um nêutron e dois elétrons.

Figura 39 - Tsunami no Japão em 2011.²³¹

Em resumo, temos:

- Faltam pedaços continentais da crosta terrestre;
- As partes cobertas por crosta basáltica, dita oceânica, possuem no máximo 250 Ma;
- Há 250 Ma ocorreu a maior extinção terrestre;
- A cobertura terrestre é fértil – compatível com a vida atual – desde que a vida atual foi inaugurada, no Cambriano (540 Ma);
- A cobertura lunar é fértil – compatível com a vida atual da Terra;
- A cobertura lunar é isotopicamente similar aos minerais da crosta terrestre.

Enfim, o cenário é compatível com uma aproximação lunar há 250 Ma, que teria colapsado a crosta continental terrestre e ejetado este material menos denso para cobrir a Lua e deixá-la com a densidade média atual.

²³¹ Quando a Lua se aproxima, as forças de maré podem engatilhar catástrofes, como a de março de 2011 no Japão. Vídeo disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=DALFGPaCXcw>.

APÊNDICE D – Variações da distância lunar.

A queda de um meteorito comprime o solo até que este reaja como uma explosão (descompressão), criando uma cratera circular cujo foco estaria a uma profundidade equivalente ao diâmetro da cratera. Como fruto de uma explosão, a cratera é circular para meteoritos que incidam sob diversos ângulos (ver Figura 40). A cratera fica deformada no caso de a queda realizar-se a baixa velocidade, ou de o ângulo de queda ser tal que o meteorito resvale (MELOSH, 1996, cap. 2).

Figura 40 - Exemplo de uma cratera de impacto

As bordas da cratera ficam cobertas por material ejetado pelo impacto (em cinza).²³²

Ernst Öpik²³³ (1961) discutiu as elípticas de crateras lunares em áreas selecionadas. Alguns dos dados obtidos são aceitos como devidos ao impacto oblíquo. Entretanto, pequenos componentes preferenciais de elipticidade são indicados e interpretados como possíveis efeitos posteriores pelas deformações das marés da Terra sobre a Lua (ver Figura 41). O autor

²³² Ilustração apresentada por MELOSH, 1996, cap. 2.

²³³ Ernst Julius Öpik (1893-1985) foi destacado astrofísico. Entre suas descobertas estão: - a 1ª computação da densidade de uma matéria degenerada (anã branca 40 Eri B), em 1915; - a primeira determinação precisa da distância de um objeto extragaláctico (a Galáxia de Andrômeda), em 1922 (com melhor precisão e um ano antes de Hubble); - O registro correto do número de crateras em Marte, em 1922, bem antes de detectadas por sondas espaciais; - Em 1932 postulou (18 anos antes de Oort) que os cometas no sistema solar se originavam na órbita de uma nuvem distante, além de Plutão. Esta nuvem é hoje conhecida por nuvem de Öpik-Oort. Inventou ainda uma câmera especial para o estudo de meteoros.

apresenta e detalha didaticamente seus cálculos estatísticos, onde faz uso das fórmulas²³⁴ para as deformações de marés em uma superfície não elástica.

Figura 41 - Superfícies se deformam ante forças gravitacionais²³⁵.

A gravidade transforma círculos em elipses, esferas em ovóides.

As deformações as crateras lunares, apesar de pequenas, são significativas. Elas sugerem que as crateras foram formadas quando a distância Terra-Lua era da ordem de 30.000-50.000 km. A aparência não danificada das crateras, exceto pela erosão do impacto e inundações, e a ausência de sinais de grandes deformações da crosta indica que desde sua formação, as crateras lunares não poderiam ter ocorrido a uma grande distância temporal.

Se as crateras pré-mare²³⁶ marcam o fim de um processo contínuo de acreção²³⁷ que construiu a Lua, as pequenas deformações sistemáticas observadas das crateras são compatíveis apenas com a Lua recebendo acreção de uma nuvem de fragmentos que circundava a Terra em órbitas diretas a uma distância de cinco a oito raios terrestres. Segundo Öpik (1961), não é possível aceitar a alternativa da Lua ter acrescido a partir de material interplanetário orbitando o Sol. O estágio final da acreção lunar deve ter ocorrido a uma distância de 200.000 km da Terra.

²³⁴ Fórmulas desenvolvidas e apresentadas no livro The Earth (JEFFREYS, 1976, 1924).

²³⁵ Ilustração disponível em <https://universe-review.ca/R13-10-NSeqs06.htm>.

²³⁶ O termo mare, ou maria, denomina as planícies basálticas, vastas e escuras na superfície no lado visível da Lua.

²³⁷ Acreção é o processo de desenvolvimento e crescimento de planetas por corpos menores (denominados planetesimais) que são atraídos e incorporados à massa do planeta em crescimento. Na Terra, a acreção é da ordem de 40.000 toneladas por ano.

A aproximação até 30.000 km entre Terra e Lua (ÖPIK²³⁸, 1961) provocaria o colapso da crosta terrestre? (ver Apêndice B - O limite de Roche.). Teria sido esse evento, de aproximação lunar, o que fez a Terra perder parte de sua crosta e deixou os continentes na posição em que estão atualmente?

Ainda temos na memória as imagens do grande terremoto e tsunami no Japão, em março de 2011 (ver Figura 42). Mas o que nos prometiam os jornais e sites de ciência alguns dias antes? Uma Lua muito próxima da Terra, uma superlua, a maior dos 18 anos anteriores.²³⁹

Figura 42 - Tsunami no Japão, março de 2011.²⁴⁰

É conveniente deixar registrado que o hélio-3 observado por Luann Becker (ver cap. 3.5 – Mudanças Climáticas Orbitais.) é abundante no solo lunar. Os relatos sobre o evento Permo-Triássico podem ser, em nosso entender, compatíveis não necessariamente com uma explosão (teoria de George Darwin) ou um choque lunar (teoria de Frank Taylor), mas com uma simples aproximação lunar.

²³⁸ Ellipticities of lunar craters in selected areas of Kuiper's Atlas are discussed. Small preferential components of ellipticity are indicated and interpreted as possible after-effects as past tidal deformations. Formulae for tidal-rotational deformations of line elements on an elastic nonresisting surface are given.

²³⁹ Ver: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2011/16mar_supermoon.

²⁴⁰ Ilustração disponível em <http://g1.globo.com/tsunami-no-pacifico/noticia/2011/03/onda-de-tsunami-fez-navio-parar-em-cima-de-casa-no-japao.html>. Foto: Yomiuri Shimbun/AP.

APÊNDICE E – Alternativas à Teoria da Tectônica de Placas.

Neste meio século, uma história propagada tem sido a da Teoria da Tectônica de Placas²⁴¹, que exige, para funcionar, que a crosta seja formada por "placas". Entretanto, desde que a Teoria começou a ser discutida, são buscados os limites dessas placas (ORESQUES, 2003).

Figura 43 - Mapa dos limites difusos das placas tectônicas²⁴²

Os tracejados indicam os limites de placas nunca confirmados, ou seja, inexistentes.

Apesar das explícitas cadeias de montanhas meso-oceânicas, e das fossas abissais, muitos dos demais limites nunca foram encontrados (ver Figura 43), apesar de inúmeras tentativas, da ampliação das pesquisas e da melhoria dos equipamentos. Ou seja, estamos comprovando há décadas que muitas das placas não existem e, portanto, a Teoria não poderia funcionar.

²⁴¹ Na teoria da tectônica de placas, a parte mais exterior da Terra é composta de duas camadas: a litosfera, que inclui a crosta e a zona solidificada na parte mais externa do manto, e a astenosfera, que inclui a parte mais interior e viscosa do manto. Numa escala temporal de milhões de anos, o manto parece comportar-se como um líquido superaquecido, mas em resposta a forças repentinas, como os terremotos, comporta-se como um sólido rígido. A litosfera estaria fragmentada em várias placas tectônicas e estas deslocar-se-iam sobre a astenosfera.

²⁴² Fonte: Editorial Vicens Vives.

A maioria dos livros didáticos advoga que o processo da Tectônica de Placas existe há bilhões de anos, e que as placas se movem pelo espalhamento do assoalho oceânico; entretanto todos os fundos oceânicos possuem menos de 250 milhões de anos (Ma). Ademais, temos encontrado grandes pedaços de continentes no meio dos oceanos (TORSVIK, 2015, 2013, e outros). São crostas graníticas com até 2 bilhões de anos! Um oceano pode ter se aberto e empurrado a África e América do Sul, mas tenha "se esquecido", por exemplo, da Elevação do Rio Grande no meio do Oceano Atlântico? (ver Figura 44).

Figura 44 - Mapa da Elevação do Rio Grande²⁴³

Elevação a 1.300 km da costa brasileira.

Fatos e teorias não são opostos, mas interdependentes. A teoria organiza os fatos explicando-os pelas suas relações. Os fatos são a base empírica das teorias - podem corroborá-las ou refutá-las. A ciência se produz por interação: da teoria aos fatos (dedução), ou dos fatos à teoria (indução). A teoria ordena de forma a promover explicações possibilitando previsões (explicar é poder prever). A Teoria da Tectônica de Placas não tem conseguido, por exemplo, prever os terremotos.

Arthur A. Meyerhoff (1996, p.5) ressalta que, "para a tectônica de placas ter credibilidade, ela precisa ser consistente com os dados biogeográficos", como os que ele compila em seu livro.

²⁴³ Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/> Acesso em 1/3/2016.

Enquanto os táxons de Gondwana eram conhecidos somente a partir do sul da zona de sutura (Indus-Yarlung), o argumento da tectônica de placas era consistente. No entanto, quando os táxons de Gondwana foram encontrados no noroeste da China (Xinjiang), Manchúria (Província de Heilongjiang), a região de Primor'ye ao norte de Vladivostok, a bacia de Tunguska a noroeste do lago Baikal e a bacia do rio Kolyma ao longo da costa da Sibéria Ártica, tiveram suas identificações ignoradas; Muito foi dito para criar descrédito, mesmo quando documentação cuidadosa foi apresentada (por exemplo, Zimina, 1967; Samylina and Yefimova, 1968; Sun Ailin, 1973²⁴⁴; Fang et al, 1979; Kalandadze and Rautian, 1983; Zhang Lujin, 1983a; Gu Zhiwei, 1984). No entanto, a realidade da maioria das identificações, como os ossos do réptil triássico *Lystrosaurus* de Xinjiang, não pode ser negada, porque a maioria dos fósseis em questão foram examinados por especialistas (Vozenin-Serra, 1984).

"Se o mesmo critério de tectônica de placas usado na região do platô Himalaia-Xizang (Tibet) fosse aplicado na América do Sul, uma zona de sutura de 7.500 km deveria ser reclamada no oeste da América do Sul, numa costa pré-carbonífera de entre 100 e 300 km do Oceano Pacífico" (MEYERHOFF, 1996, p.42). Este autor chama nossa atenção para o existência de um litoral pré-carbonífero a oeste dos Andes, desde onde este se ergue, até as fossas no Pacífico (ver Figura 45). Do Panamá ao sul do Chile, a faixa litorânea pré-carbonífera, com cerca de 300 km de largura e 7.500 km de comprimento, separa os Andes das fossas oceânicas. Se as fossas marcassem a região de subducção que ergue os Andes, de onde teria vindo essa faixa litorânea?

²⁴⁴ The Permian and Triassic periods of the geological history are the times of rapid radiation and expansion of the primitive reptiles. Their fossil remains are known from a number of localities on all continents. The study of the faunal distribution is beneficial to the elucidation of the palaeogeography of these periods.

Figura 45 - A faixa pré-carbonífera a oeste dos Andes²⁴⁵

O trecho a seguir não poderia ser traduzido sem perder o sentido imputado pelo autor: "If this global study of biodiversity through time is correct, and it is very convincingly presented, then a lot of what we are being taught about plate tectonics should more aptly be called Globaloney (blend of global and baloney - nonsense). So – are we students deliberately taught only part of a complex story? As a result, has our scientific objectivity become flawed?"²⁴⁶ (MEYERHOFF et al, 1996, Prefácio).

A tectônica de placas é mencionada como parte substancial das trocas atmosféricas ao longo dos tempos. Se ela não funciona como tem sido propagado, temos o dever de buscar alternativas à formação dos climas pretéritos e presente.

Quais razões hipotéticas levariam os geocientistas a aceitar a teoria da Tectônica de Placas como algo revolucionário que unificou suas ciências? "Primeiramente, ela é fácil de ensinar (beautifully simple) ... Em segundo lugar, possui baixo impacto em seu trabalho (low hurdle) ... Um reino de terror se seguiu; os que não aceitaram a tectônica de placas foram ridicularizados ou considerados ultrapassados." (MOLNAR, in ORESKES, 2003, p.324). O

²⁴⁵ Fonte da ilustração: <http://andeangeophysical.com/index.php?ID=7>.

²⁴⁶ Se este estudo global da biodiversidade através do tempo estiver correto e for apresentado de forma muito convincente, então muito do que tem sido ensinado sobre a tectônica de placas deveria ser mais apropriadamente chamado de Globaloney (mistura de global e “baloney” - besteira). Então, somos nós estudantes conscientemente ensinados de apenas parte de uma história complexa? Como resultado, nossa objetividade científica tornou-se falha?

mesmo se passa atualmente com a ozonoesfera, ou com o aquecimento global. Claros exemplos de fixação racional da crença (por autoridade e apriorismo), conforme apresentado por Peirce (ver cap. 2.2 – Metodologia da Crença de Charles Peirce.).

Espalhamento oceânico

Não são constatadas variações na espessura na crosta basáltica de fundo oceânico. Entretanto, são sugeridas velocidades de espalhamento oceânico bastante variáveis, entre 1 e 60 cm/ano, dependendo da região.

A inviabilidade de espalhamento oceânico a partir das dorsais é advogada por Ashwal (2002), pela existência das ilhas silicáticas, como Madagascar, Ceilão, Japão, Filipinas, Cuba e Seychelles. Considerando a reciclagem do assoalho oceânico, com uma subducção de até 4 km³/ano, Van Andel (1995, p.164) estima: "Ao longo dos últimos 150 milhões de anos, uma tira de fundo do oceano de 8.000 km de comprimento desapareceu sob os Andes, o Pacífico Norte diminuiu em 13.000 km, e no Mediterrâneo foram engolidos 1.000 km da placa africana."

Em 2014 o Brasil conquistou o direito de pesquisa, para fins de exploração comercial, da região denominada Elevação do Rio Grande (ver Figura 44), uma região granítica (crosta continental) a 1.500 km da costa sudeste. Além das crostas ricas em cobalto, as pesquisas também constataram a ocorrência de outros minérios, como níquel, platina, manganês e terras raras. Uma das possibilidades aventadas (MORIAK et al, 2010) é que se trate de um "remanescente de crosta continental, deixado para trás (sic) durante o processo de separação entre a América do Sul e a África."

Um dos esteios da tectônica de placas seria o espalhamento basáltico oceânico, a partir das cadeias mesoceânicas. Sendo o presente a chave do passado, precisamos considerar a existência no presente do microcontinente Mauritia (TORSVIK et al, 2013²⁴⁷), de constituição silicática, no caminho desta pretensa deriva da Índia (ver Figura 46). Estudos geocronológicos observaram ali zircões do Palaeoproterozoico (1.971 milhões de anos) ou do Neoproterozoico (de 660 a 840 Ma). Uma equipe da Universidade de Oslo (TORSVIK et al, 2015) também identificou recentemente um microcontinente (350 x 70 km) sob o basalto da Islândia.

²⁴⁷ They we use U–Pb dating to analyse the ages of zircon xenocrysts found within young lavas on the island of Mauritius, part of the Southern Mascarene Plateau. We find that the zircons are either Palaeoproterozoic (> 1,971 million years old) or Neoproterozoic (between 660 and 840 million years old).

Figura 46 - Espessura da crosta, baseado em gravidade inversa e *hotspots* de Reunião.²⁴⁸

²⁴⁸ Ilustração disponível em: http://www.nature.com/ngeo/journal/v6/n3/full/ngeo1736.html?WT.ec_id=NGEO-201303. Acesso em 06/09/2015.

APÊNDICE F – Conexões no Permiano.

O Permiano é o último período da era Paleozoica, seguindo-se ao período Carbonífero e anterior ao período Triássico, que inaugura a era Mesozoica. Ele se estende de 299 a 252 Ma, e termina com a maior extinção em massa que se conhece. Precedendo à grande extinção, o Permiano testemunhou a diversificação dos amniotas iniciais até os lepidossauros, arcossauros e tartarugas.

No Permiano coexistiriam um supercontinente, que englobava o conhecido Pangea, e um oceano global, que englobava quase toda a crosta, chamado Pantalassa. A similaridade entre o *Mesosaurus brasiliensis*²⁴⁹ com uma espécie africana foi usada há um século nas argumentações sobre a Teoria da Deriva Continental (WEGENER, 1924).

Uma hipótese inovadora, resultante desta pesquisa, é a explicação para as articulações dos tetrápodes do Permiano. Descobrimos que elas seriam compatíveis com as articulações de um lagarto moderno, que vive exclusivamente em árvores, em virtude de o solo de seu habitat ser dominado por serpentes (ver Figura 47). Já no Permiano, a vida em árvores se dava em virtude dos terrenos alagados, o que também dificultava a propagação de incêndios, que deviam ser mais que habituais numa atmosfera com mais de 30% de oxigênio.

²⁴⁹ Pequeno réptil aquático encontrado pelo geólogo estadunidense Israel Charles White, na cidade de Irati, Paraná, em 1908. Assim é que a geomorfológica formação Irati foi considerada do período Permiano.

Figura 47 - Anole azul (*Anolis gorgonae*) macho em Górgona, Colômbia.²⁵⁰

Durante o Permiano, os oceanos podem ter descido de nível, com o rifteamento da crosta, e a ocupação destes rifts pelas águas oceânicas. Relata-nos Peter Ward (2015, p.212) de sua viagem pelo Karoo, África do Sul: "Estas são as várias centenas de metros de estratos depositados entre 252 e 248 Ma - rochas depositadas nos últimos milênios do período Permiano e nos primeiros milhões de anos após a grande extinção em massa de 252 milhões de anos atrás."

O Paleozoico subaéreo foi dominado por plantas gimnospermas²⁵¹. As angiospermas, com flores e frutos, exigem a existência de terra seca, ambiente que só viria ser viável quando as águas oceânicas escoaram para os buracos deixados pelo rompimento da crosta silicática.

²⁵⁰ Foto de Thomas Marent, 2006, thomasmarent.com.

²⁵¹ Plantas vasculares que não necessitam a presença de solo seco para reprodução.

APÊNDICE G – Perda de energia pela Terra.

Na acepção de Crowley (1998, p.45), quanto à evolução orográfica da zona Indo-Asiática, "apesar dos recentes e significativos progressos no exame de elementos tectônicos específicos, a idade e a magnitude da deformação no sistema como um todo permanece completamente não compreendido." Seria a orogenia resultante de uma acomodação crustal? Uma contração planetária?

Buscando explicações para o afastamento entre Lua e Terra, assisti em 2015 a um grupo de palestras no Instituto de Física, professadas por George Matsas, a respeito de relatividade e física quântica. Isso levou-me a ler um livro dele, sobre a formação de buracos negros. Diz o professor Matsas²⁵²:

Estrelas são gigantescas fornalhas onde núcleos leves, como o hidrogênio, fundem-se dando origem a núcleos mais pesados. Esse fenômeno é denominado fusão nuclear e tremendas quantidades de energia são liberadas no processo. Essa é a origem de todo o calor e luz que, por exemplo, recebemos do Sol. Toda essa energia, por sua vez, induz uma enorme pressão na estrela de dentro para fora, que é contrabalançada pela força gravitacional que puxa a matéria no sentido contrário. Enquanto o equilíbrio entre essas forças perdura, a estrela permanece estável.

O nosso Sol já tem uns 5 bilhões de anos e deve durar outro tanto. Porém, com o fim do combustível nuclear (ou seja, do hidrogênio e outros elementos leves) a força gravitacional passa a dominar a estrela e começa a colapsar. Se a massa da estrela for suficientemente alta, o processo culmina numa explosão titânica denominada supernova (MATSAS, 2008, p.78-79).

Assim foi que e senti incentivado a calcular, mesmo que a grosso modo, a equivalência em massa da perda de energia sofrida pela Terra ao longo de sua vida (ver Tabela 14). Será que essa perda implicaria no surgimento de espaços (ocos) no subsolo? Os cálculos foram baseados numa dissipação termal de 24 W/m^2 (proposto pelo IPCC), conforme esquema (ver Figura 11 - Esquema do balanço energético anual estimado para a superfície da Terra.).

²⁵² Para explicar o que são e como se formam os buracos negros, os autores fazem uma retrospectiva histórica dos avanços da física. Partem dos principais pensadores da física, chegando à Einstein e à mecânica quântica.

Tabela 14 - Perda de massa terrestre, em função da perda de energia²⁵³

$E=mc^2$ (energia versus massa, $m = E/c^2$)		
Descrição	Quantidade	Unidades
Velocidade da luz	299.792.458	m/s
Raio da Terra	6.371.000	m
Superfície da Terra	127.516.117.977.447	m ²
Dissipação de calor termal	24	W/m ² (J/s.m ²)
Idade da Terra	143.488.800.000.000.000	s
Energia dissipada	439.131.233.981.815 x 10 ¹⁸	J (kg.m ² /s ²)
Massa dissipada	4.885.993.921.047.610	kg
Densidade média da Terra	5.520	kg/m ³
Volume dissipado	885.143.826.277	m ³
Esfera dissipada	5.956	m

Concluí que toda a massa transformada em energia dissipada ao longo dos 4,5 bilhões de anos do planeta resultaria num espaço oco interno equivalente a uma esfera de cerca de 6 km. Mesmo que a energia dissipada fosse 1.000 vezes maior, resultaria numa redução de meros 2 metros no raio do planeta. Ou seja, podemos crer que não seria esse um bom caminho para constatar algum colapso crustal ou contração do planeta.

²⁵³ Cálculos e tabela elaborados pelo autor.