UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS: UMA VISÃO SISTÊMICA

ROMERO MEYRELLES DUARTE

VITÓRIA
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS: UMA VISÃO SISTÊMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geografia como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Geografia, sob orientação da Prof[a] Dr[a] Cláudia Câmara do Vale.

ROMERO MEYRELLES DUARTE

VITÓRIA
2013

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS: UMA VISÃO SISTÊMICA

ROMERO MEYRELLES DUARTE

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Geografia como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Geografia, sob orientação da Prof[a] Dr[a] Cláudia Câmara do Vale.

Aprovado por:

_____

Prof[a]. Dr[a]. Cláudia Câmara do Vale – Orientadora – UFES

_____

Prof. Dr. Eberval Marchioro - UFES

_____

Prof. Msc. Carlos Alberto Kuster Pinheiro – UVV

Vitória, 17 de setembro de 2013

A minha mãe, que sempre incentivou minha vontade de estudar, e à minha amada, Francielle, que me apoiou quando estive prestes a desistir perante as dificuldades, que descansou minha mente e meu coração quando mais precisei recuperar minhas forças.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, os quais me apoiaram não só durante o árduo caminho da graduação, mas por todo o caminho que levou até este. Em especial à minha mãe, educadora, exemplo que tive em casa de como a educação e o conhecimento podem ser importantes na vida.

Agradeço à professora Cláudia Câmara do Vale, a qual se mostrou mais do que uma professora, mas uma amiga; mais do que uma orientadora de graduação, uma conselheira para a vida, desde o agora longínquo ano de 2005, quando nos conhecemos e quando tive a honra de cursar a primeira disciplina com ela. Basta dizer que a disciplina ministrada foi a de Climatologia para perceber o quanto essa pessoa me influenciou durante toda essa jornada. Agradeço aos livros emprestados, às horas de conversa, aos *e-mails* trocados, aos cafés compartilhados e àquele livro de Fritjof Capra que ganhei de aniversário em 2007.

Agradeço aos colegas de graduação Amandio G. de Oliveira Filho, Érika Machado e Mariana Loyola Novais, com os quais compartilhei muitas horas de trabalhos, estudos e conversas e cujos talentos, personalidades e capacidades sempre admirei.

Agradeço ao Prof. Dr. Antônio Machado da UNESP, ao Prof. Dr. Ricardo Felício da USP e à equipe do site Fakeclimate pela indicação de material de estudos e pelos *e-mails* trocados discutindo mudanças climáticas.

Agradeço ao Prof. Dr. Luís Henrique Ramos de Camargo pelos *e-mails* trocados discutindo clima e totalidade.

Agradeço ao Prof. Dr. Archimedes Perez Filho por todo o incentivo e pelas sugestões de leitura.

Agradeço a Ceridwen de cujo caldeirão obtive sabedoria. Agradeço a Odin, de cujas runas obtive conhecimento. Agradeço a Exu, que nas madrugadas escuras iluminou as encruzilhadas.

RESUMO

O alarmismo ambiental tem propagado informações, muitas vezes equivocadas, sobre o terma mudanças climáticas, que tem sido amplamente discutido não apenas no meio científico, mas também na mídia e no cotidiano das pessoas. O ser humano tem sido apontado como causador de um aquecimento global sem precedentes e seu instrumento de destruição é o dióxido de carbono liberado para atmosfera. Contudo, tanto a hipótese de que o Homem esteja causando uma mudança climática, quanto a própria hipótese de que está havendo uma, têm sido amplamente questionadas por diversos cientistas. A partir do conhecimento sobre os fenômenos climáticos e sobre a história geológica da Terra surgem argumentos contundentes de que outros fatores, como os Ciclos de Milankovitch e os raios cósmicos, são tão ou mais influenciadores do clima do que o efeito estufa causado pelo dióxido de carbono. Dentro do arcabouço da teoria de sistemas, todos esses fenômenos são vistos como integrantes de um complexo padrão em redes, dentro do qual também está o Homem, não como dominador da natureza, mas apenas como mais um elemento do Sistema Terra. Nesse contexto sistêmico não há causas únicas, mas sim complexas inter-relações que criam ciclos de retroalimentação. Da mesma forma que o Homem deixa de ter sua posição enquanto ator protagonista do planeta, seu paradigma científico que parecia lhe dar todas as explicações sobre a natureza dominada também deixou sua posição de hegemonia científica, cabendo a novas teorias responderem às novas perguntas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, aquecimento global, Teoria de Sistemas, paleoecologia.

ABSTRACT

The environmental alarmism has been propagating information, many times erroneous, about the climate changes, which has been largely discussed not only in the scientific environment, but also in the media and in people's everyday. The humankind has been pointed as the causer of a global warming without precedents and its destruction instrument is the carbon dioxide released in the atmosphere. However, the hypothesis of a man-made climate change and the climate change assumption itself has been broadly questioned by many scientists. From the knowledge about the climatic phenomena and the Earth's geological history arose striking arguments that other factors, like the Milankovitch cycles and the cosmic rays, have the same or even more influence over the climate than the greenhouse effect caused by carbon dioxide. Inside the Systems Theory understructure, those phenomena are understood as constituents of a web kind complex pattern, in which is the mankind, not as natures ruler, but only as another Earth System element. In this systemic context there are no single causes, but complex interrelationships that creates feedback cycles. The humankind was dropped of its leading actor position in the planet, likewise its scientific paradigm, which used to provide it with all kind of explanations about the dominated nature, has also fallen from its scientific hegemonic position, leaving for other theories to answer the new questions.

Key-words: Climate change, global warming, Systems Theory, paleoecology.

“*Winter is coming”*

House Stark family words, from *A Song of Ice and Fire,* of George R. R. Martin.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....1
2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.....6
2.1. Justificativa.....6
2.2. Objetivos.....6
2.2.1. Objetivo geral.....6
2.2.2. Objetivos específicos.....6
3. MATERIAL E MÉTODOS.....7
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....8
4.1. Clima e Climatologia.....8
4.2. Teoria de Sistemas.....9
4.2.1. Conceitos sistêmicos.....11
4.2.2. Sistemas abertos e fechados.....12
4.2.3. Princípios da equifinalidade, da retroação e da adaptabilidade.....13
4.2.4. Estrutura, padrão e totalidade.....14
4.3. Teoria do Caos.....15
4.4. Tectologia.....18
4.5. Sistema Terra.....18
5. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NA TERRA.....19
5.1. O Sol enquanto fonte de energia.....19
5.1.1. As leis da radiação.....21
5.1.2. A constante solar.....25
5.1.3. As posições relativas entre a Terra e o Sol.....27
5.1.4. Irradiância solar sobre a atmosfera.....34
5.1.5. Os ciclos de Milankovitch.....36
5.1.6. Manchas Solares.....42
5.2. Energia Geotérmica.....44
5.3. Raios Cósmicos.....49
5.4. Marés.....63
5.5. Balanço de radiação e o efeito estufa.....66
5.5.1. Interações moleculares com a radiação eletromagnética.....73
5.5.2. Absorção de radiação infravermelha por gases atmosféricos.....78
5.5.3. O vapor d'água na atmosfera.....84
6. PALEOECOLOGIA.....86
6.1. Cautela em Paleoecologia e em prognósticos futuros.....87
6.2. Fósseis e Paleoecologia.....90
6.3. Datações isotópicas.....92
6.3.1. Datação por isótopos estáveis.....93
6.3.1.1. Isótopos estáveis de carbono.....94
6.3.1.2. Isótopos estáveis de oxigênio.....95
6.3.2. Datação por isótopos radioativos.....96
6.4. Mudanças climáticas globais no tempo geológico.....97

6.4.1. Quaternário: um período de glaciações 103
6.4.2. Holoceno: aquecimento ou resfriamento..... 104
6.4.3. Pesquisas paleoecológicas da Era Cenozóica..... 105
6.4.3.1. Declínio do dióxido de carbono atmosférico durante o Paleógeno 105
6.4.3.2. Forçante do dióxido de carbono é insuficiente como explicação única para explicar o aquecimento do Máximo Termal Paleoceno-Eoceno..... 108
6.4.3.3. Ligação entre dióxido de carbono e estabilidade das capas de gelo durante as maiores transições climáticas dos últimos 20 milhões de anos..... ... .109
7. A HIPÓTESE DO AQUECIMENTO GLOBAL ANTROPOGÊNICO..... ...113
7.1. A mídia e o aquecimento global..... 115
7.2. Contestações acerca do aquecimento global..... 120
8. CONCLUSÕES..... 126
BIBLIOGRAFIA..... 128

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Clássica representação de Christofoletti de um sistema aberto.................. 13
Figura 02: Exemplo de órbitas periódica e quase periódica. 16
Figura 03: Exemplo de função quase-periódica.. 16
Figura 04: Exemplo de função caótica... 17
Figura 05: Simplificação do Sistema Terra... 19
Figura 06: Tipos de energia solar que atingem a Terra 20
Figura 07: Modelo hiperbólico de tendência a longo prazo da luminosidade solar.......... 21
Figura 08: Emissão de corpo negro em função do comprimento de onda para corpos com diferentes temperaturas superficiais,............................. 22
Figura 09: Espectro eletromagnético em termos de comprimento de onda, frequência e número de onda.. 23
Figura 10: Variação diária de irradiância solar total por comprimento de onda........ 24
Figura 11: Ilustração da Lei de Lambert... 25
Figura 12: Irradiância solar medida a partir de dados dos satélites NIMBUS 7, ACRIM II e VIRGO.. 27
Figura 13: Triângulo astronômico projetado sobre a superfície esférica representativa da Terra.. 29
Figura 14: Triângulo esférico com posições relativas do observador e do Sol.............. 30
Figura 15: Duração dos dias em horas durante o ano nas latitudes 21°S e 70°N.......... 32
Figura 16: Variação anual de $(D_m/D)^2$ e declinação solar em radianos.......................... ... .33
Figura 17: Irradiância solar diária média de cada mês para as latitudes 21° S e 70° N.. 35
Figura 18: Geometria entre a Terra e o Sol... 37
Figura 19: Variações da geometria entre a Terra e o Sol. 38
Figura 20: Posição relativa entre o plano equatorial celeste e o plano da eclíptica.... ... .38
Figura 21: Efeitos das mudanças orbitais sobre a Terra.. 40
Figura 22: Ciclos de Milankovitch. 41
Figura 23: Comparação da excentricidade calculada com registros de $\delta^{18}O$ (SPECMAP). 42
Figura 24: Registro de manchas solares... 43
Figura 25: Camadas do interior da Terra. 45
Figura 26: Condução de calor em meio sólido.. 46
Figura 27: Exemplo de curva geotérmica em comparação com as curvas de fase do basalto e da olivina... 47
Figura 28: Fluxo convectivo de calor.. 49
Figura 29: Fluxo de raios cósmicos que atingem a Terra em função de sua energia...... 51
Figura 30: A curva superior mostra o fluxo de raios cósmicos a partir do monitor de nêutrons CLIMAX, no Colorado, Estados Unidos, (1953 a 1996).. 52
Figura 31: Variação na concentração de C^{14} nos últimos 1000 anos............... 53
Figura 32: Influência indireta do Sol no sistema climático terrestre através da variação do fluxo de raios cósmicos que atingem a Terra.. 54
Figura 33: Relação entre nebulosidade e fluxo de raios cósmicos de 1980 a 1995.............................55
Figura 34: Relação entre nebulosidade e fluxo de raios cósmicos de 1983 a 2002............................55
Figura 35: Correlação entre anomalia de temperatura e o decréscimo do fluxo de raios cósmicos...56
Figura 36: Correlação entre δ18O de estalagmites em uma caverna no Omã e ^{14}C atmosférico medido a partir de anéis de árvore..58
Figura 37: Comparação entre irradiância solar, concentração de ^{10}Be e temperaturas do hemisfério norte durante o Mínimo de Maunder.,,, ...,,,,,.59
Figura 38: Braços em espiral da Via-Láctea... 60
Figura 39: Movimento do Sistema Solar cruzando o plano central da Via-Láctea..... ... .61
Figura 40: Fluxo de raios cósmicos no último Eon... 62
Figura 41: Forças de maré na Terra.. 65
Figura 42: Curvas de radiância teóricas para diferentes temperaturas atmosféricas e a emissão de radiação IR da Terra, medida a partir do satélite Nimbus 4.. 67
Figura 43: Modelo de fluxo radiativo...69
Figura 44: Modelo de equilíbrio radiativo de duas camadas, com influxo solar Q...............................71

Figura 45: Balanço radiativo do sistema superfície-atmosfera.....73
Figura 46: Ilustração esquemática dos processos de absorção e emissão de radiação eletromagnética por um átomo.....74
Figura 47: Tipos de espectro de absorção e emissão. 75
Figura 48: Ilustração esquemática do arranjo geométrico dos átomos em diferentes moléculas.....76
Figura 49: Modos vibracionais de moléculas diatômicas e triatômicas.....77
Figura 50: Espectro observado por sensor interferométrico de alta resolução (S-HIS) a bordo do avião da NASA ER-2, o qual mensurou a radiação terminal emitida entre 3,3 e 18 µm sobre o Golfo do México em 2001.....79
Figura 51: Espectro de baixa resolução de absorção no infravermelho dos principais gases atmosféricos.....80
Figura 52: Curvas de transmitância entre 1200 cm^{-1} a 1400 cm^{-1} para duas amostras de CO_2 submetidas a baixas pressões.....81
Figura 53: Curvas de transmitância entre 1100 cm^{-1} a 1450 cm^{-1} para duas amostras de CO_2 submetidas a altas pressões.....81
Figura 54: Curvas de transmitância de 1400 cm^{-1} a 2020 cm^{-1}, para quatro amostras de CO_2 submetidas a diferentes condições controladas em laboratório.....82
Figura 55: Curvas de transmitância de 2065 cm^{-1} a 2100 cm^{-1}, para três amostras de CO_2 submetidas a diferentes pressões, todas contidas em célula com comprimento de 32,9m..83
Figura 56: Espectro de transmissividade nas regiões do visível e do infravermelho dos alguns dos principais gases de atmosféricos.....85
Figura 57: Desenvolvimento de mudanças ecológicas em cadeia e em paralelo.
Fonte: Suguio (2010).....89
Figura 58: Relações entre Ecologia, Paleoecologia, Taxonomia e fatores que as afetam...90
Figura 59: Fóssil de coral com linhas de crescimento diárias, cujos padrões indicam variações sazonais paleoclimáticas.....92
Figura 60: Correlação entre informações paleoclimáticas e teores de $\delta^{13}C$. 95
Figura 61: Curvas de temperatura e precipitação médias da Terra em relação às condições atuais. Tempo em milhões de anos.....99
Figura 62: Flutuações climáticas entre estádios glaciais e interglaciais.....100
Figura 63: Sequência metodológica para estudos paleoclimáticos..... 101
Figura 64: Paleotemperaturas do hemisfério norte..... 102
Figura 65: Prognóstico climático para os próximos 25 mil anos..... 105
Figura 66: Comparação entre as curvas de pCO2 e de δ18O..... 107
Figura 67: Concentração de CO_2 atmosférico no limite Paleoceno-Eoceno..... 108
Figura 68: Temperaturas globais calculadas com diferentes sensibilidades climáticas e a concentração atmosférica de dióxido de carbono em função da entrada inicial de 1000ppmv anterior ao Máximo Termal Paleoceno-Eoceno..... 109
Figura 69: Comparação de pCO2, pH e razão borato-bicarbonato para o Mioceno e para o Plioceno tardio.....111
Figura 70: Comparação de pCO2, pH e razão borato-bicarbonato para o Pleistoceno.....112
Figura 71: Médias anuais globais de forçantes radiativas (Wm^{-2}) do período pré-industrial (1750) até o presente (fim da década de 1990)..... 114
Figura 72: Anomalias anuais médias globais de temperaturas das superfícies continentais em comparação com a média do período compreendido entre 1961 e 1990.....117
Figura 73: Índice de resposta à pergunta 2.....121
Figura 74: Famoso e amplamente contestado gráfico do “Taco de Hokey” de Michael Mann.....124
Figura 75: Separação entre as componentes antrópica e naturais da variação de temperatura média anual global.....125

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Expressões Sistêmicas..... 12
Tabela 02: Diferença de radiação solar incidente sobre a latitude 45°S durante o verão e o inverno em decorrência de uma mudança na amplitude da declinação, ocorrida devido a uma suposta alteração na obliquidade..... 37
Tabela 03: Perda de calor pela superfície da Terra..... 48
Tabela 04: Calor liberado pelos principais isótopos radioativos.....48
Tabela 05: Abundância isotópica de padrões utilizados para cálculos de δ..... 94
Tabela 06: Proposta da Comissão Internacional de Estratigrafia da União Internacional de Ciências Geológicas..... 104
Tabela 07: Proposta de Kenitiro Suguio..... 104

1. INTRODUÇÃO

Uma tarde de domingo. Durante um intervalo comercial em um canal aberto de televisão brasileiro, a apresentadora anuncia o que será exibido em um típico programa enciclopédico de domingo à noite: reportagens policiais, curiosidades sobre saúde, cobertura de *reality shows* e entrevistas com celebridades. Em seu conteúdo jornalístico sobre acontecimentos internacionais e sobre curiosidades naturais, surgem imagens assustadoras de enchentes, tempestades e tornados, pessoas miseráveis em meio a uma paisagem árida, imensas geleiras das quais maciços blocos de gelo se desprendem e mergulham pesadamente em águas de um profundo azul, animais exóticos da fauna boreal vagando em meio ao cenário glacial. Anuncia-se que nesta noite, o telespectador irá assistir "tudo" a respeito do aquecimento global.

O aquecimento global é considerado um dos maiores problemas ambientais atuais, comumente tratado de forma sensacionalista e dúbia. Atribui-se a esse problema uma origem antrópica, residente principalmente na emissão de dióxido de carbono através da utilização de combustíveis fósseis (SUGUIO; SUZUKI, 2010).

Sobre tal alarmismo midiático Francisco Mendonça discorre em seu livro "Geografia e Meio Ambiente" (2002, p. 13-14):

> *Num momento em que certos fenômenos naturais adquirem caráter de sobrenaturais como na atualidade, urge resgatar a verdade que se encontra camuflada pelo sensacionalismo de grande parte da mídia (...); é preciso que se esclareça que a noção de acidente, catástrofe, castigo, etc. é de ordem, sobretudo humano-social, e que fenômenos como maremotos, terremotos, inundações, secas, vulcanismo, ilhas de calor, efeito estufa, etc. somente adquirem importância para a sociedade quando atingem ou ameaçam áreas habitadas ou de importância econômica.*

Continua o autor supracitado:

> *Esses fenômenos decorrem, basicamente, da dinâmica natural do planeta. Eles precisam ser exorcizados do sensacionalismo engendrado pela mídia (...). A vulgarização de termos como meio ambiente, ecologia, natureza e outros tem apontado muito mais para uma ecologite (doença ou inflamação dos ecos, habitats) do que para o enfoque ecologista no sentido de preservação e recuperação da natureza ou do meio ambiente.*

A partir desse tipo de massificação de informações dúbias e tendenciosas, a opinião pública é preparada para ser complacente com posições políticas que venham a ser tomadas em prol de uma suposta "sustentabilidade". Homens brancos engravatados de países ricos prometem na televisão que irão ajudar os países em desenvolvimento com recursos financeiros para que estes não precisem desenvolver o mesmo padrão de vida "insustentável" que eles adquiriram.

Léna (2012) aponta para a íntima ligação da consciência humana com a Terra, de forma que qualquer ameaça a seu lar e à suas vidas causa insegurança e temor nas pessoas. Assim, os temas ambientais e

especialmente a hipótese do aquecimento global, tornam-se temas com bastante apelo de massas quando colocados de maneira alarmista.

O surgimento de negócios ambientais, da economia verde, dos créditos de carbono, tem sido pautado em grande parte na hipótese do aquecimento global antropogênico. Sob pressão política e econômica, países têm sido pressionados a adaptar suas economias para o mercado verde. Embora a questão possua um forte enfoque político, é no seu incerto embasamento científico que residem as falhas de seu discurso.

Apesar dos mecanismos atmosféricos ainda não serem totalmente conhecidos, sabe-se que as atividades solares e os raios cósmicos são também influentes no clima planetário, embora esses fenômenos não sejam tão evidenciados na mídia (MARUYAMA, 2009). Atividade vulcânica ou mesmo a posição dos continentes – a qual muda constantemente ocasionando alterações na circulação oceânica ao longo do tempo – provocam mudanças climáticas que podem atingir escalas globais (SUGUIO; SUZUKI, 2010).

Contudo, muitos passaram a apontar dúvidas sobre a causa do suposto aquecimento global ser o aumento dos níveis de dióxido de carbono oriundo da atividade humana, tendo alguns estudos, inclusive, indicado um possível resfriamento terrestre. Os esforços científicos que poderiam ser feitos em benefício da humanidade e do planeta podem estar sendo desperdiçados em com objetivos dúbios (MARUYAMA, 2009).

Embora nas últimas décadas tenha ocorrido um constante avanço nos conhecimentos sobre o planeta Terra, advindos de perfurações submarinas profundas, satélites artificiais e sondas interplanetárias, tais conhecimentos não passam ainda de uma iniciação às dinâmicas terrestres. Projetos de pesquisa internacionais ambicionam acumular mais conhecimentos sobre a Terra através de levantamento de dados por sensoriamento remoto, mas ainda estão em fase inicial, como o *Mission to Planet Earth* [1] (SUGUIO; SUZUKI, 2010).

Há 30 anos sismólogos acreditavam que, com a evolução da informática e o acúmulo de informações, seria possível em um futuro próximo prever abalos sísmicos. Da mesma forma pensavam os climatologistas com relação à sua área de conhecimento. Entretanto, assim como prever um terremoto, a previsão climática enfrenta imensos problemas de modelagem, uma vez que a complexidade dos fenômenos ainda não é suficientemente conhecida. Os modelos simplificados que consideram apenas o efeito estufa constituem em grandes equívocos (SUGUIO; SUZUKI, 2010). A imprecisão dos modelos climáticos é apontada por diversos outros autores, como Carl Wunsch e Richard Lindzen do MIT, Luís Carlos Molion, da UFAL e Ricardo Felício da USP.

[1] Projeto, com participação de Estados Unidos, Japão, Canadá, Rússia, Brasil e União Europeia que foi iniciado em 1991 com previsão de duas décadas de pesquisas utilizando satélites como o AQUA e o ADEOS-II.

Os atuais supercomputadores utilizam modelos complexos como o *Global Circulation Model* (GCM)[2] do Prof. Akio Arakawa. Mas, apesar da capacidade dos supercomputadores, os parâmetros e variáveis utilizados nos modelos ainda são incompletos ou desconhecidos em grande parte, tais quais os mecanismos de retroalimentação do albedo e do vapor d'água, a influência dos raios solares, dentre outros. Para se prever o clima terrestre, seria necessário recriar em escala o próprio sistema solar, o que é ainda impossível para o ser humano. (MARUYAMA, 2009).

Ao se analisar as forças naturais da Terra, pode-se concluir que o papel do ser humano no planeta não é assim tão significativo e que sua capacidade de produzir energia é bem inferior à da natureza. Segundo Hamano (1993, *apud* SUGUIO; SUZUKI, 2010), se fosse convertida em eletricidade toda a energia dissipada por terremotos nos últimos 100 anos seriam obtidos 20 bilhões de watts por segundo (W*s), ao passo que a energia dissipada por vulcanismo seria da ordem de um trilhão de W*s. As crostas continentais e oceânicas liberam calor através do fluxo geotérmico crustal, por volta de 35 trilhões de W*s. Sendo o consumo individual humano cerca de 120 W*s, com uma população de seis bilhões de habitantes (à época em que foi escrito), o consumo total corresponde a 720 bilhões de W*s, superior apenas à energia dos terremotos. Contudo, se for convertida em eletricidade a energia solar que penetra na atmosfera terrestre, ter-se-ia a quantia de 100 trilhões de quilowatts por segundo (kW*s), de ordem muito superior a todas as demais fontes de energia.

O pensamento newtoniano-cartesiano, o qual permitiu o desenvolvimento da razão iluminista, dos modelos econômicos capitalista e socialista, da ciência moderna e da civilização urbano-industrial, já não atende aos anseios da sociedade. Seu método analítico e os fundamentos da física clássica – com base na mecânica newtoniana – já não são suficientes para iluminar as novas fronteiras científicas (CAMARGO, 2005).

A mistificação acerca do aquecimento global pode, dessa forma, trazer efeitos negativos ambiental, cultural, econômico e social, pois não inverte a lógica do capital de ver a natureza enquanto alheia ao homem, enquanto mero recurso a ser apropriado e comercializado, mas apenas cerceia ainda mais o acesso a esses recursos, evitando que países em desenvolvimento lancem mão destes e atinjam os mesmos patamares de consumo dos países considerados desenvolvidos.

No final do século XX e agora, no início do século XXI, a incapacidade do homem em entender a dinâmica do clima planetário apenas confirma que o pensamento analítico não é mais suficiente para entender o Universo. Para entender o planeta não basta mais estudar elementos discretos, processos e mecanismos isolados, pois o planeta não é uma máquina, tampouco o é o homem.

---

[2] Modelo que originalmente focava os movimentos convectivos da atmosfera, mas foi complementado por outros pesquisadores, já tendo mais de 110 mil linhas de código de programação.

O clima não é imutável e tampouco previsível, com fenômenos que ocorrem em ciclos harmônicos. Uma combinação de funções senoidais com algumas diferenças de fase e de amplitude não é o suficiente para prever os fenômenos climáticos como se fossem apenas funções periódicas ou quase periódicas (ver p.25), pois a ciência começa a perceber a interconectividade das formas, dos processos e dos organismos, todos se influenciando mutuamente e mudando conjuntamente as características do Sistema Terra.

Ao perceber que faz parte do ambiente, então o homem pode finalmente se indagar o quanto ele influencia o Universo e o quanto é influenciado por este. Pode o homem alterar o clima? Em que escalas e magnitudes? Ou estaria o ser humano em um panorama sombrio, sendo mero espectador ou coadjuvante em um cenário de mudanças planetárias às quais ele desconhece e cujos efeitos podem lhe ser negativos, e até mesmo catastróficos?

Será o homem capaz de prever e de controlar a natureza? Capaz até de alterar o clima planetário, amplificando ou reduzindo o chamado Efeito Estufa quando assim o quiser? Ou as mudanças climáticas apenas mostram uma nova perspectiva na qual o homem novamente se veja sujeito às forças naturais, como na Antiguidade?

Contudo, o pensamento analítico e a ciência newtoniana não passam a ser inválidos. Pelo contrário, isolar as partes e entender cada elemento, cada mecanismo, ainda é útil para a compreensão da realidade. Entender o mecanismo de formação de uma nuvem e entender os movimentos da Terra dentro do Sistema Solar ainda é importante para a compreensão do clima. Mas simplesmente somar os efeitos de processos isolados não é suficiente para conhecer o clima terrestre e a dinâmica planetária. Como Capra (1996) aponta, o pensamento sistêmico se pauta no entendimento de que todas as teorias científicas são limitadas e aproximadas. Dessa forma, expõem-se as limitações do antigo paradigma, mas não se excluem seus méritos e avanços.

Embora muitos mecanismos tenham sido apontados como causadores de mudanças climáticas, havendo boas correlações entre temperatura e variabilidades na irradiância solar, as concentrações de dióxido de carbono atmosférico, o número de manchas solares, os ciclos de Milankovitch, entre outros, nenhum dos mecanismos parece ser suficiente para, sozinho, causar a variabilidade climática percebida ao longo do tempo geológico. Como o próprio professor Suguio (2010) ressalta, qualquer apontamento de causa única – como o dióxido de carbono antropogênico – está automaticamente equivocado, uma vez que as evidências paleoecológicas apontam para uma complexidade de eventos que se inter-relacionam em paralelo ou em reações em cadeia.

Com o advento da chamada cosmoclimatologia, Svensmark (2007) aponta a influência dos raios cósmicos como a peça que faltava no quebra-cabeça o qual mostrava que os ciclos solares têm forte influência sobre a temperatura terrestre, embora a irradiância solar em si não fosse suficiente

para causar a variabilidade encontrada. Juntamente com os estudos do físico israelita N. Shaviv (2002; 2003; 2005), ficam mais evidentes as correlações do clima terrestre com eventos cósmicos.

Jasper Kirkby e sua equipe no CERN realizaram o experimento CLOUD (KIRKBY *et al*, 2011), enquanto a equipe do Centro Espacial Nacional Dinamarquês realizaram o experimento SKY (SVENSMARK, 2007), os quais comprovaram que que raios cósmicos atuam como catalizadores na atmosfera, acelerando a formação de núcleos de ácido sulfúrico, os quais servem como núcleos de condensação para formação de gotas, aumentando assim a nebulosidade, que por sua vez aumenta a reflexão de radiação de ondas curtas, causando um efeito de resfriamento. Esses experimentos foram fundamentais para levar a compreensão dos fenômenos atmosféricos a um novo nível de conhecimento e abrindo novas frentes de pesquisa, considerando uma influência cósmica ainda pouco conhecida como bastante influente na dinâmica da Terra.

A visão da Terra enquanto um sistema (CAMARGO, 2005; CAPRA, 1996) contribui para que a ciência supere a visão de mecanismos isolados do planeta e passe a vê-lo enquanto uma totalidade complexa e dinâmica, auto reguladora, cujos diversos elementos interagem em escalas e magnitudes diversas. Ou seja, pequenos eventos podem desencadear grandes efeitos, mas também grandes eventos podem produzir mudanças não tão significativas no sistema. Isso torna a própria noção de clima mais complexa e misteriosa.

Para entender o clima global enquanto parte da totalidade planetária, faz-se necessário compreender o Sol, enquanto fonte principal de energia da Terra. Há que se entender ainda eventos cósmicos que podem interferir no clima, assim como a importância da composição atmosférica e da própria influência humana. Faz-se necessário ainda analisar os registros geológicos que evidenciam as variabilidades cíclicas ou não do Sistema Terra, percebendo assim as complexas relações que compreendem sua totalidade.

Dessa forma, este trabalho se propõe a expor e discutir diversos componentes do sistema climático planetário e diversos fenômenos já conhecidos – mesmo que ainda pouco compreendidos ou controversos – evidenciando a multiplicidade dos fenômenos climáticos que podem ocasionar mudanças em escala global. Entretanto, sob uma perspectiva sistêmica, pretende indagar se alguma das possíveis causas por si só – inclusive o dióxido de carbono – mostra-se suficiente para desencadear as mudanças climáticas em épocas atuais ou passadas.

2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

2.1 Justificativa

Este trabalho justifica-se pela necessidade do debate científico acerca do tema Mudanças Climáticas Globais, embasado em argumentações independentes de influências políticas ou econômicas. Diante dos argumentos que cercam a hipótese do aquecimento global antropogênico, torna-se sadio e produtivo o debate científico mediante contra argumentação, visando unicamente contribuir para o avanço na compreensão dos fenômenos naturais do planeta Terra, conhecimento este que pode possibilitar melhoras na qualidade de vida dos seres humanos na medida em que estes conheçam melhor a natureza à qual pertencem.

A ideia de consenso científico acerca de um atual aquecimento global não se faz salutar socialmente, uma vez que informações equivocadas ou manipuladas são expostas na mídia diariamente, levando desinformação à sociedade. Gera-se um mal-estar e um terror acerca de um cenário catastrófico com viés de piora. Embora o tema proposto seja bastante extenso e certamente não possa ser esgotado em uma monografia de graduação, este trabalho justifica-se também, então, para apresentar o que há de debate científico sobre o tema e que na maioria das vezes é ignorado pela mídia e pelo poder público.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo geral

Discutir por meio de argumentação encontrada em vasta bibliografia científica de diversos ramos das geociências que os aumentos de temperatura média registrados em diversos lugares do planeta nos últimos séculos do Holoceno podem ser causados por fatores diversos, naturais ou antrópicos, cíclicos ou eventuais, sendo incoerente qualquer teoria de causalidade única.

2.2.2 Objetivos específicos

Identificar diversos fenômenos naturais que influenciem o clima nas escalas de tempo geológica e espacial.

Averiguar se teorias mais recentes, ou mesmo mais polêmicas, poderiam subsidiar mudanças na compreensão acerca do sistema Terra-Sol.

Procurar entender a história paleoclimática da Terra para apontar se as mudanças climáticas recentes podem ou não fazer parte de um ciclo natural.

Procurar perceber o conceito de mudanças climáticas globais sob a perspectiva da Teoria de Sistemas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado na forma de extenso levantamento bibliográfico, utilizando textos já bastante conhecidos sobre climatologia, artigos que sejam referência no assunto e diversas pesquisas recentes, publicadas em periódicos científicos renomados que mostram a atual fronteira científica da climatologia. Na bibliografia também foram pesquisados textos que pudessem fornecer um embasamento teórico sobre como a ciência contemporânea pode compreender melhor os fenômenos climáticos e buscar respostas às suas questões atuais.

Este não consiste em um projeto de pesquisa que está preocupado em levantar dados quantitativos sobre determinados assuntos, nas diversas sub áreas da Geografia, mas se propõe a dissertar, sobre um dos temas mais intrigantes da Geografia, que é o clima e suas modificações ao longo do tempo.

Em função de ser um estudo que visa se debruçar sobre uma vasta bibliografia, desde a Geografia, a Geodésia, a Física Quântica, a Meteorologia, dentre outros, a metodologia restringiu-se às leituras e apreensões de diversas obras em vários idiomas, sobre o assunto.

Para a confecção das figuras 15, 16 e 17, foi utilizado o programa CLIMASOL, de autoria do próprio autor (DUARTE, 2013), o qual automatiza alguns dos cálculos abordados nos itens 5.1.3 e 5.1.4.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. Clima e Climatologia

Para Liou (2002, p.442), o clima é o estado “médio” atmosférico, observado através de análises estatísticas de variáveis atmosféricas, como temperatura, umidade e precipitação, em escalas diversas de tempo. Mudanças no clima envolvem interações da atmosfera com outras partes do sistema climático, como os oceanos, o gelo, a superfície dos continentes, às perturbações antrópicas, etc. A variabilidade natural do sistema Terra-Sol inclui diversos aspectos, como as mudanças na constante solar devido à variação orbital da Terra ou à atividade solar ou mudanças na composição atmosférica devido a erupções vulcânicas. Ainda há a possibilidade de mudanças antrópicas, que mudam o albedo local, transformam as superfícies florestadas ou a composição atmosférica devido à emissão de gases. Ainda nas palavras de Liou (*op cit)*:

> *Uma compreensão do clima terrestre e das mudanças climáticas necessita ser acompanhado de um compreensivo entendimento da radiação emitida pelo Sol e pela absorção da energia solar pela atmosfera e pela superfície, assim como da emissão de energia infravermelha termal pelo sistema Terra-atmosfera.*

Já Mendonça e Danni-Oliveira (2007) lembram que os conceitos mais tradicionais de clima preocupam-se com a caracterização do comportamento médio dos elementos atmosféricos, como temperaturas médias, precipitações médias, pressão, etc. As médias estatísticas costumam ser estabelecidas a partir de uma série representativa de dados de pelo menos 30 anos. Esse conceito de clima enquanto sendo as médias dos elementos atmosféricos foi defendido por Hann e utilizado por muitos anos por climatologistas, como aponta Barros e Zavattini (2009).

A definição de clima de Sorre (1951, *apud* BARROS; ZAVATTINI, 2009) o trata enquanto uma série de estados atmosféricos sobre um lugar, considerando a totalidade dos estados e não suas médias. Isso possibilita abarcar as anomalias, as quais são excluídas das médias. Sorre ainda considerava a sucessão dos tipos de tempo, seu ritmo, sua duração. Esses tipos de tempo são as combinações diversas de estados atmosféricos restritas local e espacialmente que se repetem de forma aproximada.

Mendonça e Danni-Oliveira (2007), então, conceituam a Climatologia enquanto o estudo científico do clima, tratando do comportamento da atmosfera e das interações desta com a superfície terrestre e com o ser humano durante um período longo de tempo. Dessa forma, abordando relações entre homem e

natureza, a Climatologia se faz ramo científico eminentemente geográfico ao mesmo tempo em que se constitui também ramo da Meteorologia.

Barros e Zavattini (2009) entendem que a climatologia, embora tenha aplicação direta nos estudos de Geografia Física, tem arcabouço metodológico inegavelmente ligado à Meteorologia.

Por sua vez, Vianello e Alves (1991) definem Climatologia enquanto o estudo científico do clima interessado principalmente nas aplicações práticas. Ela utiliza os mesmos dados básicos da Meteorologia, inclusive subsidiando-a, mas objetiva descobrir o comportamento normal da atmosfera visando o benefício humano. Para esses autores, a Climatologia não se enquadra inteiramente dentro da Meteorologia, tampouco dentro da Geografia, pois se trata de uma ciência aplicada com métodos meteorológicos e objetivos geográficos.

4.2. Teoria de Sistemas

A concepção de sistema consiste em um conjunto de elementos os quais se relacionam entre si de acordo com certa organização. O conceito de sistemas é intuitivo, mas atualmente se erigiu todo um arcabouço teórico acerca de uma abordagem científica de sistemas.

Para o devido entendimento do pensamento sistêmico, faz-se necessária a compreensão da perspectiva humana em relação à realidade do ambiente e a evolução do processo de conhecimento na forma de ciência (VICENTE; PEREZ FILHO, 2003).

As ciências de base, como a Física, a Química e a Biologia, costumam extrair uma lógica causal do mundo, impondo à complexidade do todo limitações de modelos estanques. Os fundamentos científicos de Nicolau Copérnico com a teoria heliocêntrica, Johannes Kepler com as leis das órbitas planetárias, Galileu Galilei com as leis sobre os movimentos dos corpos, Francis Bacon com o método empírico dedutivo, René Descartes com seu método analítico, e Isaac Newton com sua Lei da Gravitação Universal e toda a sistematização da Mecânica Clássica por séculos foram suficientes para responder questões sobre a natureza e conduzir o homem ao patamar civilizatório e tecnológico atual. A ciência newtoniano-cartesiana possibilitava a predição dos fenômenos naturais, entendo-os como uniformes, constantes e periódicos, como se todo o Universo fosse uma grande máquina. Essa natureza intelectualmente dominada pelo homem passou então a ser vista enquanto objeto também fisicamente dominável através da tecnologia (VICENTE; PEREZ FILHO, 2003; CAMARGO, 2005; CAPRA, 1996).

Nardone (2012) afirma que o modelo newtoniano é determinista, no qual se pode predizer o futuro a partir de condições iniciais. Nele, o objetivo do cientista é, em boa parte, a previsão, o que é bastante ambicioso.

Entretanto, o paradigma mecanicista sempre esteve ciente de sua incompleta visão do Universo, diante da não linearidade e do dinamismo de certos fenômenos, como a sociedade em si. Todas as tentativas de se tentar explicar

tais fenômenos através do paradigma mecanicista fracassaram. Mas nem só os fenômenos sociais eram insuficientemente explicados pela ciência newtoniano-cartesiana, como a própria física se revelou mais complexa do que o previsto, como com o advento da Termodinâmica, com seus processos conservativos e dissipativos, ou com a descoberta da física subatômica, a qual não era preditiva, mas probabilística e caótica (VICENTE; PEREZ FILHO, 2003).

Camargo (2005) aponta que o ponto do início da mudança do paradigma científico vigente se deu quando o físico Max Planck, em 1900, propôs a ideia de que a energia térmica não fluía continuamente, mas sim se propagava na forma de pacotes energéticos chamados quanta. Mais tarde, Albert Einstein, desenvolvendo pesquisas sobre o efeito fotoelétrico, veio a confirmar a validade da teoria quântica. Ressalta-se o fato de que Einstein não era "partidário" da teoria quântica, mas acabou rendido à mesma quando pôde provar que as partículas subatômicas comportavam-se como matéria sólida e também como ondas.

O físico Werner Heisenberg, complementando a fundamentação da física quântica, postulou então o Princípio da Incerteza, explicando que no mundo subatômico não é possível prever a posição, a velocidade ou o momento das partículas simultaneamente, pois o simples fato de medir uma dessas propriedades já altera as demais. Dessa forma, as partículas não estão em lugar algum, mas na verdade podem estar, probabilisticamente, em uma região do espaço. Estava então decretado o fim do paradigma mecanicista, o qual podia descrever e prever com exatidão todos os fenômenos naturais. O homem não era mais senhor do Universo.

As partículas subatômicas – agora entendidas enquanto padrões de probabilidades e não mais enquanto corpúsculos – são padrões de prováveis interconexões. Estas não são elementos independentes, não existindo enquanto entidades isoladas. As partículas subatômicas passam a ser entendidas como interconexões de elementos, os quais também são interconexões de outros elementos (CAPRA, 1996). A probabilidade de existência de uma partícula é evidenciada pelo comportamento do sistema, que indica a existência da mesma em uma provável região interagindo com as outras partículas.

Dessa forma, os físicos perceberam que não mais poderiam tentar explicar as propriedades da matéria descobrindo suas menores partículas, pois não existiam mais partículas para serem divididas, havia pacotes de energia que possuíam natureza dual partícula-onda e que podiam estar probabilisticamente em diversos locais.

A incerteza, o indeterminismo, a complexidade, a interconectividade, todos estes conceitos segregados pela ciência newtoniano-cartesiana passavam agora a ser incorporados à noção de realidade.

O conceito intuitivo de sistemas já existia há muito tempo, desde as concepções teóricas de Newton e de pensadores ainda mais antigos. A mecânica clássica chega a tratar de sistemas fechados e estáticos, como simplificações da realidade. Contudo foi o biólogo Ludwig Von Bertalanffy que

viria mais tarde, com seu livro *Teoria Geral de Sistemas*, a organizar e efetivar o conceito de sistemas, muito influenciado pelos adventos da termodinâmica e da física quântica (VICENTE; PEREZ FILHO, 2003; CAMARGO, 2005).

A Teoria Geral dos Sistemas é crítica ao pensamento analítico no ponto em que este considera a aditividade das partes do todo e não sua interconectividade, ou seja, para entender o todo basta entender cada parte isoladamente, pois somadas correspondem ao todo. Já a teoria sistêmica supera esse conceito fragmentar e passa a se preocupar metodologicamente com o entendimento das interações entre os elementos, essencial para a compreensão dos sistemas abertos de qualquer natureza, ou seja, é metodologicamente aplicável a quaisquer disciplinas científicas (CAMARGO, 2005).

Enquanto o pensamento analítico procurava isolar partes para compreendê-la, o pensamento sistêmico procura contextualizar os elementos a fim de conhecê-los. O paradigma cartesiano-newtoniano se baseou na certeza, ao passo que o paradigma sistêmico entende que todas as teorias científicas são limitadas e aproximadas (CAPRA, 1996).

Contudo, pode-se perceber que o pensamento sistêmico não exclui o analítico, mas apenas evidencia suas limitações. A exemplo do que pensa Lévy-Leblond (2012), a ciência só continua a progredir quando se reinteressa por momentos de sua história considerados ultrapassados.

Nesse sentido, Capra (1996, p.49) cita Heisenberg: “O que observamos não é a natureza em si, mas a natureza exposta ao nosso método de questionamento”.

Dessa forma, isolar elementos com intuito de entendê-los ainda se faz um exercício mental eficiente no processo de conhecimento. Quando nas aulas de física o professor começa com um exemplo que desconsidera o atrito e a resistência do ar, ele está simplificando um modelo a fim de torná-lo inteligível em um primeiro momento. Depois ele passa a considerar não só o atrito e a resistência do ar, mas passa a considerar a aceleração da gravidade enquanto função da latitude e da altitude, os volumes enquanto funções de pressão e temperatura, os quais são funções interdependentes entre si. A partir de então o estudante percebe a complexidade envolvida no problema e sabe que seus resultados serão sempre aproximações da realidade.

Para Vicente e Perez Filho (2003), a causalidade e a complexidade percebidas no micro universo servem de base para uma releitura do macro universo, pela própria razão da interconectividade sistêmica em diferentes escalas.

Para alguns autores, como Tricart (1977), o conceito de sistema é o instrumento mais lógico para aplicar em estudos ambientais, primeiro por ser de caráter dinâmico em sua essência, segundo, por permitir a dialética entre a análise e da visão integrada, em conjunto.

4.2.1. Conceitos sistêmicos

A metodologia sistêmica emprega o uso de alguns termos específicos e cruciais para seu emprego. A tabela abaixo, organizada por Pinheiro (2011) apresenta alguns desses conceitos.

Tabela 01: Expressões Sistêmicas.

EXPRESSÕES EMPREGADAS NA VISÃO SISTÊMICA DA PAISAGEM	
***Input* de energia**	Nenhum organismo é auto-suficiente, pois necessita sempre de energia, de importação de energia do ambiente externo; os sistemas abertos importam energia do ambiente; os seres animais e vegetais sobrevivem devido à troca constante de energia;
Transformação de energia	Toda energia que entra como *input* no organismo é transformada, processada em forma de uma nova energia disponível; a natureza processa materiais em forma de nova energia, visando à sobrevivência das espécies;
Entropia (grau de desordem de um sistema)	Os organismos do meio ambiente se desgastam e tendem a morrer, por isso é imprescindível que esses sistemas adquiram entropia negativa; para sobreviver, os sistemas abertos precisam mover-se, a fim de deter o processo entrópico; necessitam adquirir entropia negativa – energia transformada de baixa entropia – visando evitar a desorganização do sistema; assim, o processo entrópico dos sistemas abertos conduz à desestruturação dos organismos biológicos, sistema aberto, que importa mais energia do meio ambiente do que desprende, armazena energia e adquire entropia negativa;
***Feedback* negativo**	Todo sistema aberto, a receber energia ou *input* em demasia, emite uma mensagem de *feedback* negativo com o intuito de manter o sistema na direção correta; os *inputs* para os sistemas abertos conduz não consiste somente em materiais contendo energia, os quais são transformados em novas formas de energia, as entradas de materiais nos sistemas abertos também são de caráter informativo, proporcionando uma sinalização, uma espécie de sensor que avisa o sistema sobre a qualidade de energia retroalimentada; o mecanismo de *feedback* negativo permite aos sistemas abertos corrigir distorções e chegar a um novo estado de equilíbrio; quando o *feedback* de um sistema é interrompido, o seu estado de equilíbrio desaparece, a entropia domina os seus mecanismos de retroalimentação, conduzindo-o ao perecimento; energia de baixo aproveitamento
Homeostase	Consiste em um conjunto de elementos auto-reguladores de um sistema aberto que permite manter o estado de equilíbrio do sistema; a energia importada do meio ambiente de baixa entropia é usada para manter uma constância no sistema; existe um intercâmbio constante entre os diversos sistemas por meio de influxos e exportação de energia; o processo homeostático envolve a manutenção do sistema por intermédio da variabilidade reduzida, decorrente dos efeitos externos; o importante é a preservação do caráter estável do sistema; o excesso de energia entrópica faz com que o sistema não mais suporte o estado de equilíbrio inicial e o conduz a um novo ponto de equilíbrio ou a sua completa deterioração

Fonte Fiers (2008) *apud* Pinheiro (2011).

4.2.2. Sistemas Abertos e Fechados

Bertalanffy (1975) separa os sistemas em fechados e abertos. Os do primeiro tipo são sistemas os quais não trocam energia e matéria com o meio circundante. Esses sistemas tendem ao caos interno, de forma que caminham para sua desintegração.

Já os sistemas abertos são aqueles que trocam energia e matéria com o meio. Bertalanffy (1975) trata esses sistemas como compostos por quatro atributos principais: objetos, atributos, relações de interdependência e meio ambiente.

Objetos são os elementos componentes do sistema, podendo ser físicos ou abstratos – até mesmo virtuais, com o advento dos sistemas de informação.

Os atributos são as propriedades dos objetos e também do sistema em si.

As relações de interdependência são aquilo que define um sistema em si, sendo as propriedades que emergem entre os objetos ou entre o todo e seus objetos. Essas relações não são propriedades de objeto algum, mas sim um efeito mútuo entre dois ou mais objetos e entre estes e o sistema.

O meio é o cenário no qual se inserem os sistemas. Tricart (1977) afirma que cada elemento de um sistema pode ser visto como subsistema, de forma que não há limites inferiores ou superiores de escala. Sob essa ótica é possível dizer que todo sistema é um subsistema de um sistema maior, o qual consistiria no meio do subsistema.

Os sistemas abertos possuem um fluxo de energia e de matéria com o meio, sendo esse fluxo – entrada, transformação e saída de matéria e energia – necessário à manutenção dos processos internos do sistema. Ou seja, os *inputs* e *outputs* são intrínsecos aos sistemas abertos.

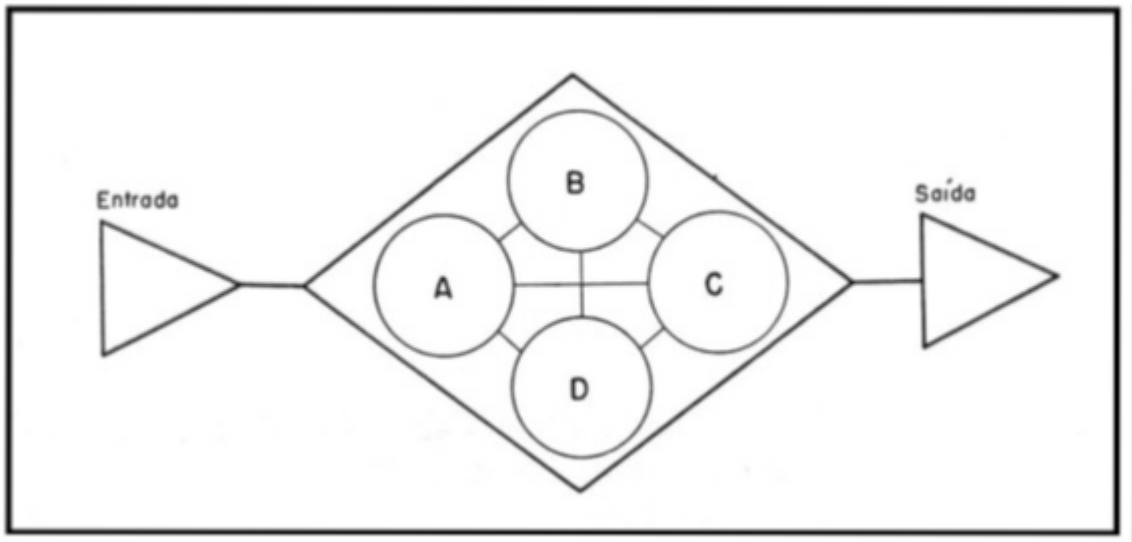


Figura 01: Clássica representação de Christofoletti de um sistema aberto.
Fonte: Christofoletti (1979).

4.2.3. Os princípios da Equifinalidade, da Retroação e da Adaptabilidade

No caso dos sistemas fechados, torna-se muito importante o princípio da equifinalidade, no qual o estado final do sistema é condicionado pelo estado inicial. Esses sistemas condizem a ambientes controlados e ideais, onde o estado final é previsível pelas condições iniciais. Já os sistemas abertos podem ser conduzidos para um estado de equilíbrio diante de uma constante troca de energia e de matéria. Os sistemas abertos, com seu contínuo fluxo de matéria e energia, sua entropia variável, mantêm-se em equilíbrio diante da construção e da desconstrução contínua (VICENTE; PEREZ FILHO, 2003). Pelo princípio da equifinalidade dos sistemas, uma vez alteradas as características e processos, o estado final também será modificado.

Outro princípio dos sistemas é a retroação, ou retroalimentação, o qual diz que os fluxos internos relacionam-se à informação interna. Esse princípio é referente a conservação homeostática e à tentativa do sistema em encontrar um determinado estado de equilíbrio. Os fluxos de energia e de matéria não só alimentam o sistema, mas comunicam os desvios do estado de equilíbrio, de forma que o sistema possa se manter em equilíbrio. Ou seja, os processos se comunicam e reagem uns aos outros de forma a manter um estado-meta do sistema (CAMARGO, 2005).

Um terceiro princípio importante definido por Bertalanffy é o da adaptabilidade, segundo o qual o sistema, uma vez tendo atingido um estado crítico, inicia um novo modo operacional vigente de forma a atingir uma nova forma de equilíbrio. Esse princípio indica a capacidade de auto-organização criativa dos sistemas (CAMARGO, 2005).

Partindo do princípio da adaptabilidade, os sistemas tenderiam a evoluir para estados mais complexos, de forma que sua destruição seria de fato sua recriação com uma totalidade hierarquicamente mais complexa.

Capra (1996) aponta três características do princípio da auto-organização. A primeira indica que a auto-organização é criativa no sentido em que possibilita a criação de novas estruturas e novos comportamentos do sistema. A segunda é que a auto-organização é uma característica evidente dos sistemas abertos, afastados do equilíbrio, o que possibilita a criatividade auto-organizadora. A terceira característica é que a auto-organização resulta das inter-relações não lineares, as quais permitem os laços de retroalimentação.

4.2.4. Estrutura, Padrão e Totalidade

Para entender um sistema faz-se necessário observar a rede de relações inerentes ao mesmo, de forma que se possa perceber seu padrão organizacional, sua estrutura, seus processos. Assim, a partir do entendimento da teia de relações em constante fluxo evolutivo, percebe-se a totalidade do sistema (CAMARGO, 2005).

A estrutura do sistema é o seu arranjo físico, suas formas, sua composição química, ou seja, efetivamente o conjunto dos elementos com suas características próprias. A estrutura do sistema vem a constituir seu padrão (CAMARGO, 2005).

Já o modo como os elementos se relacionam em uma teia é o padrão do sistema, ou seja, é a configuração das relações entre os componentes. Camargo (2005) exemplifica discorrendo sobre o arranjo único dos elementos de cada época ecológica, de forma que um determinado conjunto de componentes possui um determinado padrão organizacional. Alguns sistemas evoluem e crescem para além de seus limites críticos, a partir de onde adquirem padrões instáveis de organização, o que pode leva-los a procura de um novo padrão organizacional pelo princípio da adaptabilidade.

Para o físico Fritjof Capra (1996), é importante perceber que o padrão intrínseco aos sistemas abertos é o padrão em rede, pois as redes possuem

relações essencialmente não lineares e o próprio conceito de retroalimentação está intimamente relacionado a esse padrão de organização.

A totalidade do sistema não é a mera soma de suas partes, mas sim o fruto das relações sinérgicas entre estas. Devido ao princípio da adaptabilidade, ou auto-organização, os sistemas tendem a evoluir para sistemas de complexidade cada vez maior. A totalidade se mantém em evolução buscando novas totalidades (CAMARGO, 2005).

4.3. Teoria do Caos

Na década de 1960, o meteorologista Edward Lorenz, desenvolvendo sistemas de equações não lineares para modelagem de fenômenos meteorológicos, percebeu que condições iniciais levemente distintas, com o tempo, produziam resultados bastante diversos, o que viria mais tarde a fundamentar a Teoria do Caos (CAPRA, 1996).

Esta teoria explica que pequenas variações introduzidas em um sistema, por mais simples que seja, conduzem a uma série de variações internas que podem levar todo o sistema a mudanças radicais (VICENTE; PEREZ FILHO, 2003).

Matematicamente, caos não é sinônimo de desordem, mas sim de comportamento estocástico, governado por probabilidades, aleatoriedades e irregularidades. Caos, nesse sentido, torna-se antônimo de comportamento determinístico (CAMARGO, 2005).

Já Kitzberger Rodrigues (2004) aponta que atualmente caos é um termo atribuído à classe de movimentos na física determinística cujo comportamento num longo período de tempo é sensível às condições iniciais, mas ainda de forma impreditível. Neste argumento há a contradição de incluir um sistema impreditível dentro do arcabouço determinista, revelando uma resistência de alguns pesquisadores em aceitarem a indeterminação. Essa resistência é uma característica da mudança de paradigma, a qual pode demorar muitos anos para se concretizar ou mesmo nunca ser plenamente aceita.

Lorenz demonstrou que, enquanto alguns sistemas físicos com características periódicas podem ser preditos por equações deterministas, qualquer sistema não periódico, como a atmosfera, é simplesmente impreditível (CAPRA, 1996).

Coelho (2006), explica que uma série é periódica quando é composta por duas frequências e a razão entre elas é um número racional. Quando a evolução da série atinge um período referente à frequência fundamental a série retorna ao estado inicial. Já uma série quase periódica é aquela cuja razão entre as frequências componentes é um número irracional de forma que evolução da série nunca retorna ao mesmo ponto.

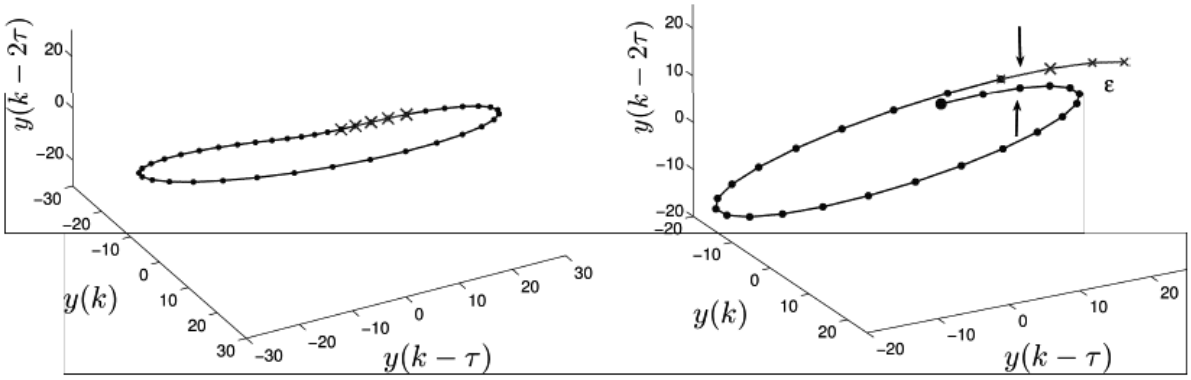


Figura 02: Exemplo de órbitas periódica e quase periódica.
Fonte: Coelho (2006).

Kitzberger Rodrigues (2004) define função periódica como aquela cujos valores se repetem no tempo. Já as funções quase periódicas são composições de funções periódicas, onde ciclos dentro de ciclos podem ser visualizados e as trajetórias flutuam em torno de um padrão periódico. Já os sistemas caóticos não podem ser preditos, devido às complexas e aleatórias trajetórias possíveis.

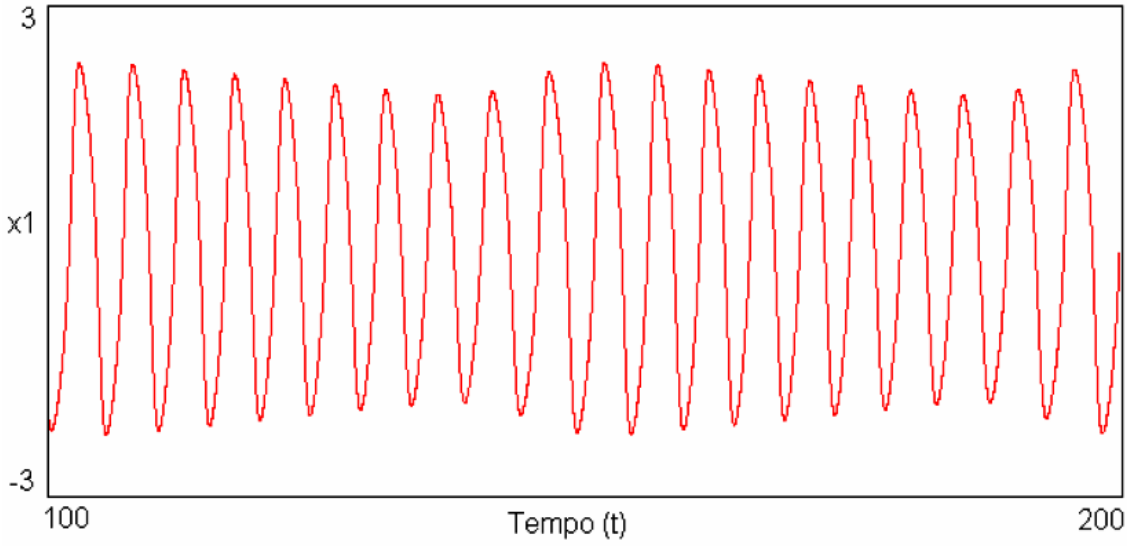


Figura 03: Exemplo de função quase-periódica.
Fonte: Kitzberger Rodrigues (2004).

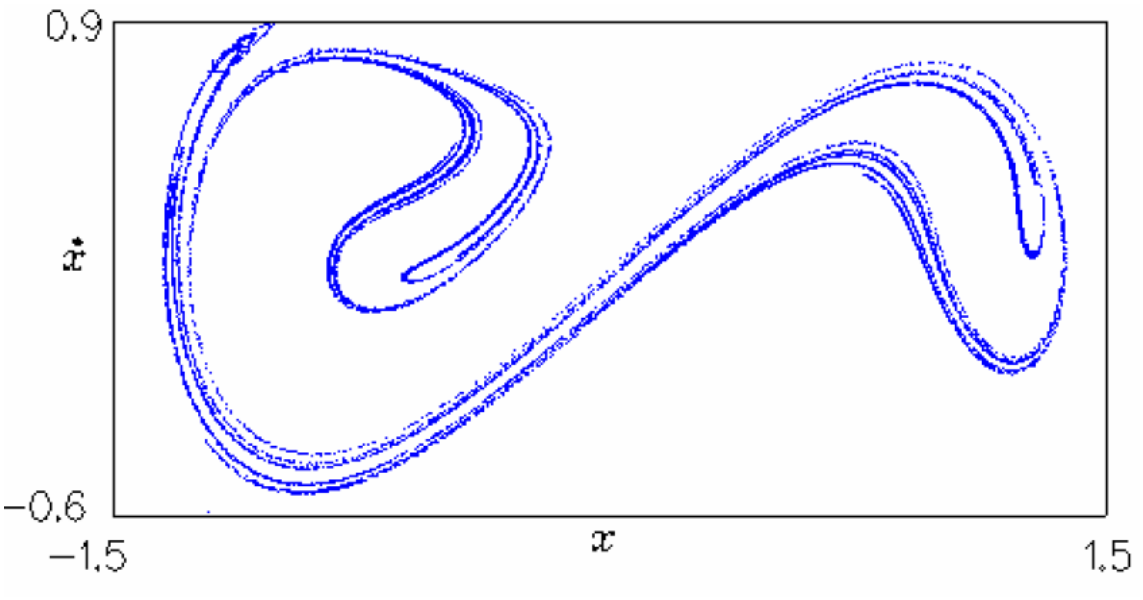


Figura 04: Exemplo de função caótica.
Fonte: Kitzberger Rodrigues (2004).

Assim, os sistemas periódicos e quase periódicos são preditíveis enquanto os não periódicos são impreditíveis. As órbitas planetárias, por exemplo, são funções quase periódicas, já a formação de nuvens é governada por funções caóticas.

Para Kitzberger Rodrigues (2004), o estudo do comportamento de sistemas cujas equações de evolução no tempo e no espaço são não lineares é conhecido como dinâmica não linear.

Equações não lineares podem amplificar exponencialmente pequenas variações em seus termos, de forma a impossibilitar qualquer predição de resultados (FIEDLER-FERRAR *et al*, 1995; BERGÉ *et al,* 1996, *apud* CAMARGO, 2005). A capacidade dos termos do sistema de equações não lineares se influenciarem uns aos outros caracteriza os sistemas dinâmicos caóticos.

Os sistemas deterministas clássicos, exemplificados pelas leis da mecânica clássica, podem ser descritos por equações lineares, nas quais a partir da determinação de suas variáveis é possível predizer um estado futuro do sistema ou um estado passado do mesmo. Esse comportamento pode ser visto na cinemática, na mecânica celeste e no movimento harmônico.

Em um sistema caótico, por exemplo, poder-se-ia lançar uma bola para o alto, mas não se poderia determinar sua posição em um instante posterior, ao contrário de um sistema regido pela cinemática da mecânica clássica. No sistema caótico, após determinado tempo, poder-se-ia apenas determinar a probabilidade da bola estar em uma posição, pois diversos fatores aleatórios poderiam influenciar simultaneamente o objeto em seu percurso.

Na teoria do caos, a aleatoriedade e a impreditibilidade permitem tanto que as menores alterações no sistema acarretem grandes efeitos, quanto grandes alterações causem efeitos insignificantes.

A matemática da teoria do caos pode não realizar previsões quantitativas, mas pode fazer previsões qualitativas, ou comportamentais. Dessa forma, há previsibilidade no caos, embora não haja a preditibilidade determinista (CAPRA, 1996).

4.4. Tectologia

Capra (1996) aborda a teoria do russo Alexander Bogdanov, denominada *Tectologia*, desenvolvida na década de 1910, precedendo, portanto, a teoria de Bertalanffy. A tectologia foi desenvolvida enquanto uma ciência das estruturas a qual antecipou grande parte da teoria de sistemas, mas que, na época, ainda era muito à frente de seu tempo, tendo ficado em latência por décadas.

Bogdanov definiu três tipos de sistemas complexos: os complexos organizados, os complexos desorganizados e os complexos neutros. Em palavras simples, os complexos organizados são aqueles nos quais o todo é maior do que a soma de suas partes, enquanto os complexos desorganizados são aqueles nos quais o todo é menor do que a soma das partes. Já os neutros são aqueles nos quais os processos organizadores e desorganizadores se anulam.

4.5. Sistema Terra

Léna (2012) afirma que não é mais possível conceber a Terra como outrora se fazia. Hoje se sabe, por exemplo, que ela é achatada nos polos, deformada constantemente, agitada por placas tectônicas em movimento e por oceanos que ora absorvem, ora liberam gases. O estudo de fenômenos como ciclones, terremotos, erupções vulcânicas ou mesmo do próprio clima, sublinha a dificuldade de apreender de maneira racional o comportamento e a dinâmica de sistemas acoplados e instáveis, nos quais inúmeras variáveis tornam inapreensível o encadeamento de causas e efeitos.

Edgar Morin (2012) define a Terra como um planeta singular, um conjunto global e um sistema complexo. Para ele, conhecer a Terra demanda o conhecimento das diversas partes que a constituem, passando das partes para o todo e do todo para as partes.

A partir dos pressupostos teóricos expostos, pode-se entender o Sistema Terra como um sistema aberto, caótico, de alta complexidade, em equilíbrio dinâmico, cuja principal fonte energética é o Sol, e tem sua atmosfera como regulador de *inputs* e *outputs*.

O sistema pode ser simplificado da seguinte forma:

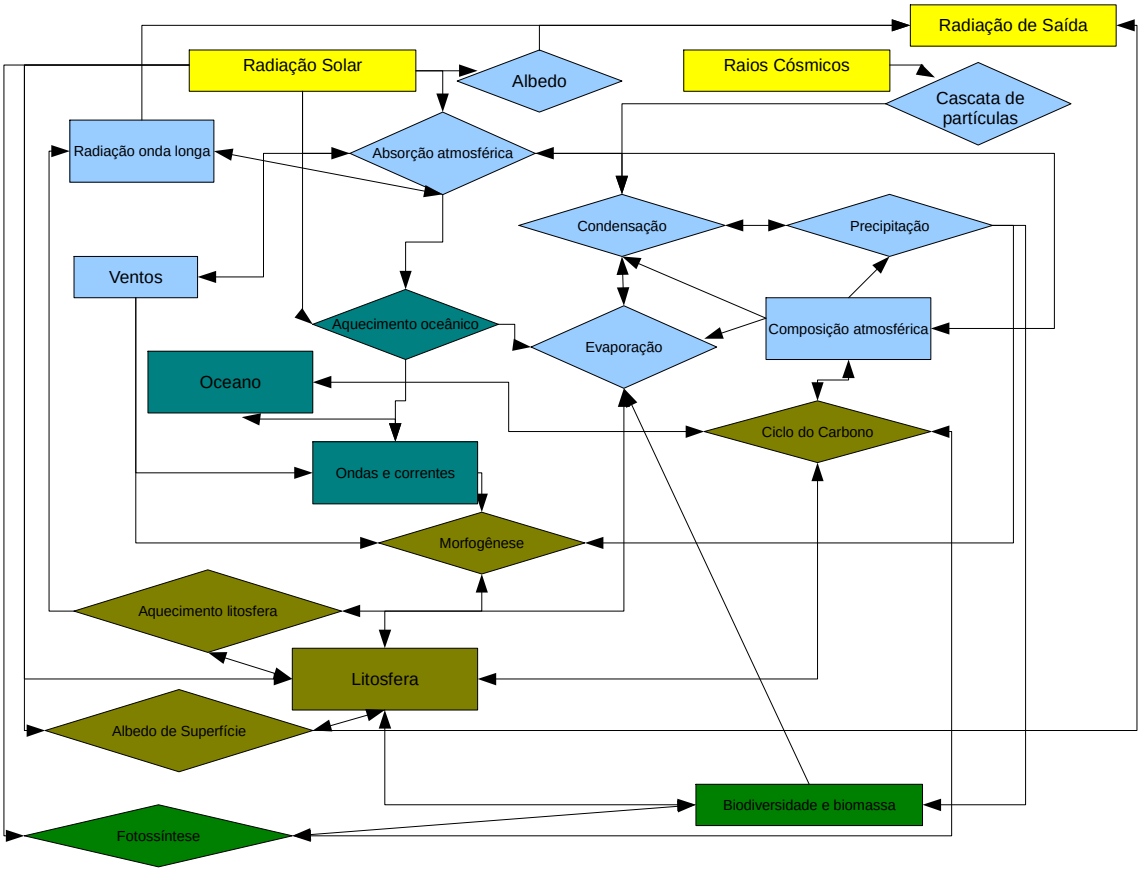


Figura 05: Simplificação do Sistema Terra, onde os objetos são representados por retângulos e as inter-relações por losangos.
Fonte: Organizado pelo autor.

A figura 05 demonstra um modelo simplificado do Sistema Terra, no qual as entradas e saídas estão ilustradas com a cor amarela. O subsistema atmosférico está representado pela cor azul clara, enquanto a cor azul escura identifica o subsistema oceânico. A litosfera pode ser visualizada com a cor marrom, enquanto a biosfera está representada com a cor verde.

O capítulo 5 (pág. 20) abordará com maior aprofundamento aspectos do fluxo energético no Sistema-Terra

5. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA NA TERRA

5.1 O Sol enquanto fonte de energia

A atmosfera terrestre é um sistema termodinâmico, de forma que para entender seus fenômenos faz-se necessário entender sua principal fonte energética, que é o Sol. As variabilidades dos fenômenos atmosféricos dependem diretamente da radiação solar que chega à atmosfera terrestre (VIANELLO; ALVES, 1991).

Mendonça e Danni-Oliveira (2007) afirmam que para entender as relações entre a atmosfera e a superfície terrestre, faz-se necessário compreender que praticamente todos os fenômenos ocorridos no que chamam de Sistema Superfície-Atmosfera são originados a partir da radiação solar, concordando com o que afirma Ambaum (2010), para quem o Sol é a principal fonte de energia para a Terra.

O Sol é uma estrela de massa média e diâmetro abaixo da média entre as demais estrelas no universo, formada principalmente por hidrogênio (H) e hélio (He). Acredita-se que a energia solar seja obtida principalmente a partir da fusão de quatro átomos de H, que se tornam um átomo de He, emitindo fótons nesse processo. O Sol também emite energia na forma de partículas, embora a energia eletromagnética componha a maior parte de energia solar emitida para a Terra e seja a mais importante para seu clima (LIOU, 2002).

Magnitude e variabilidade das fontes solares de energia terrestre

Fonte	Energia ($W\,m^{-2}$)	Mudança durante ciclo solar ($W\,m^{-2}$)	Altitude de deposição terrestre
Radiação solar			
Irradiância total	1366	1.3	**Superfície, troposfera**
UV 2000–3000 Å	15.4	0.16	0–50 km
UV 0–2000 Å	0.1	0.02	50–500 km
Partículas			
Prótons solares	0.002		30–90 km
Raios cósmicos	0.000007		0–90 km
Vento solar	0.0003		**Cerca de 500 km**

Figura 06: Tipos de energia solar que atingem a Terra.
Fonte: Adaptado de NATIONAL RESEARCH COUNCIL *apud* LIOU (2002).

Modelos físicos do Sol calculam que a radiação solar há 4 bilhões de anos era cerca de 75% da atual e que continuará crescendo em uma tendência hiperbólica enquanto as reservas de hidrogênio do núcleo continuarão a ser consumidas nos próximos 4 bilhões de anos. Essa evolução do Sol muda a temperatura da fotosfera e, consequentemente, o espectro de emissão (BEER *et al.*, 2000).

O Sol apresenta variabilidades em suas condições que podem durar minutos ou bilhões de anos. O mais famoso ciclo solar conhecido é o ciclo de 11 anos de Schwabe. Além disso, são conhecidos ciclos de 22, 88, 208 e até 2000 anos. A radiação e a distribuição espectral desta apresentam mudanças de fase e de amplitude nesses ciclos de atividade solar, não havendo, portanto, uma linearidade que possibilite previsões exatas dessas variações (BEER *et al.,* 2000).

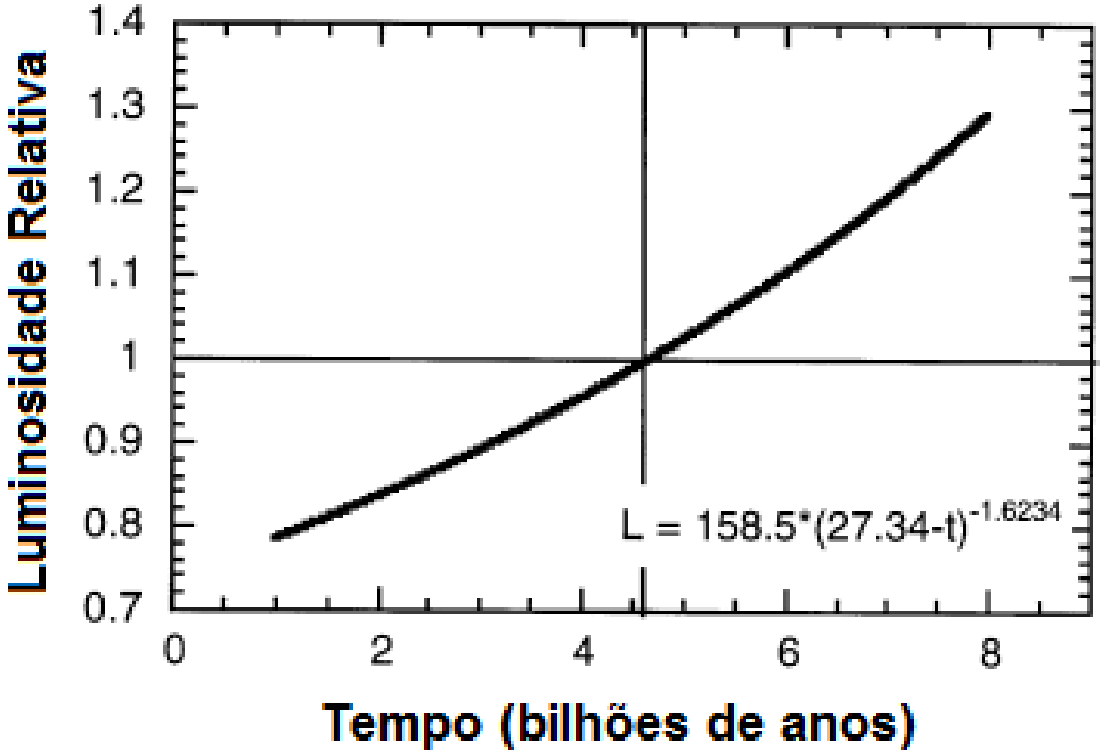


Figura 07: Modelo hiperbólico de tendência a longo prazo da luminosidade solar. A luminosidade relativa de valor unitário corresponde a atual irradiância solar à 1 UA, 1365 Wm^{-2}.
Fonte: Adaptado de Beer *et al.*, (2000).

5.1.1 Leis da radiação

Para a simplificação dos cálculos, costuma-se considerar o Sol e a Terra como corpos negros. O corpo negro é um corpo físico hipotético capaz de absorver toda a energia incidente sobre si (VIANELLO; ALVES, 1991).

A emissividade monocromática (ε_λ) é a razão entre a emitância monocromática de um corpo e a de um corpo negro. Observando-se a lei da conservação de energia, um feixe de energia eletromagnética ao atravessar um determinado meio sofrerá os processos de absorção, de transmissão e de reflexão. Sendo a absortividade (α_λ), a transmissividade (τ_λ) e a reflectância (r_λ):

$$\alpha_\lambda + \tau_\lambda + r_\lambda = 1 \qquad (5.1)$$

A Lei de Kirchhoff diz que para um comprimento de onda e uma temperatura determinados, a absortividade α_λ de um corpo negro é igual à sua emissividade (ε_λ).

$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda = 1$ (5.2)

A lei de Planck relaciona a intensidade monocromática emitida com a frequência e a temperatura do corpo emissor. Através dessa função pode-se obter a emitância espectral ($E_{b\lambda}$) de um corpo negro.

$E_{b\lambda} = C_1 / (\lambda^5 [e^{(C2 / \lambda T)} -1]$ (5.3)

Sendo:

$C_1 = 3{,}7427 \times 10^8$ W μm^4 m^{-2};

$C_2 = 1{,}4388 \times 10^4$ μm K;

e ≈ 2,72 (número de Euler);

λ = comprimento de onda em μm;

T = temperatura em Kelvin.

A partir da função de Planck podem-se estimar as frequências de maior emissividade do Sol, cujo espectro de emissão abrange frequências desde raios gama até ondas de rádio.

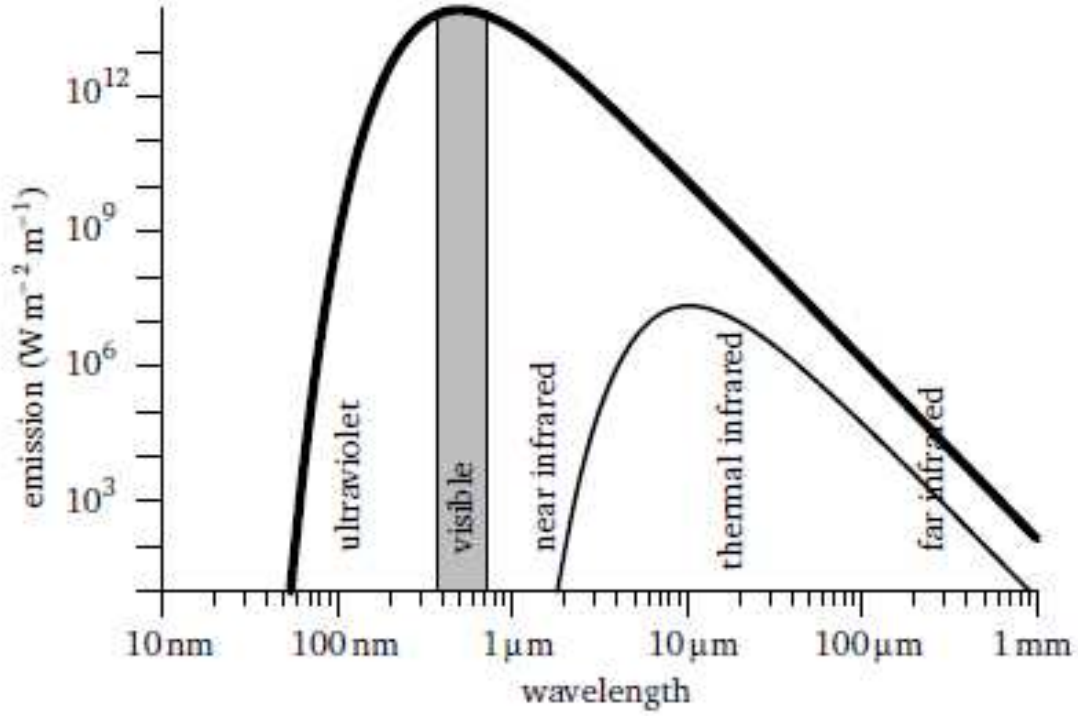


Figura 08: Emissão de corpo negro em função do comprimento de onda para corpos com diferentes temperaturas superficiais, 5780 K (temperatura superficial do Sol) a linha mais grossa e 280 K (temperatura superficial da Terra) a linha mais fina.
Fonte: Ambaum (2010).

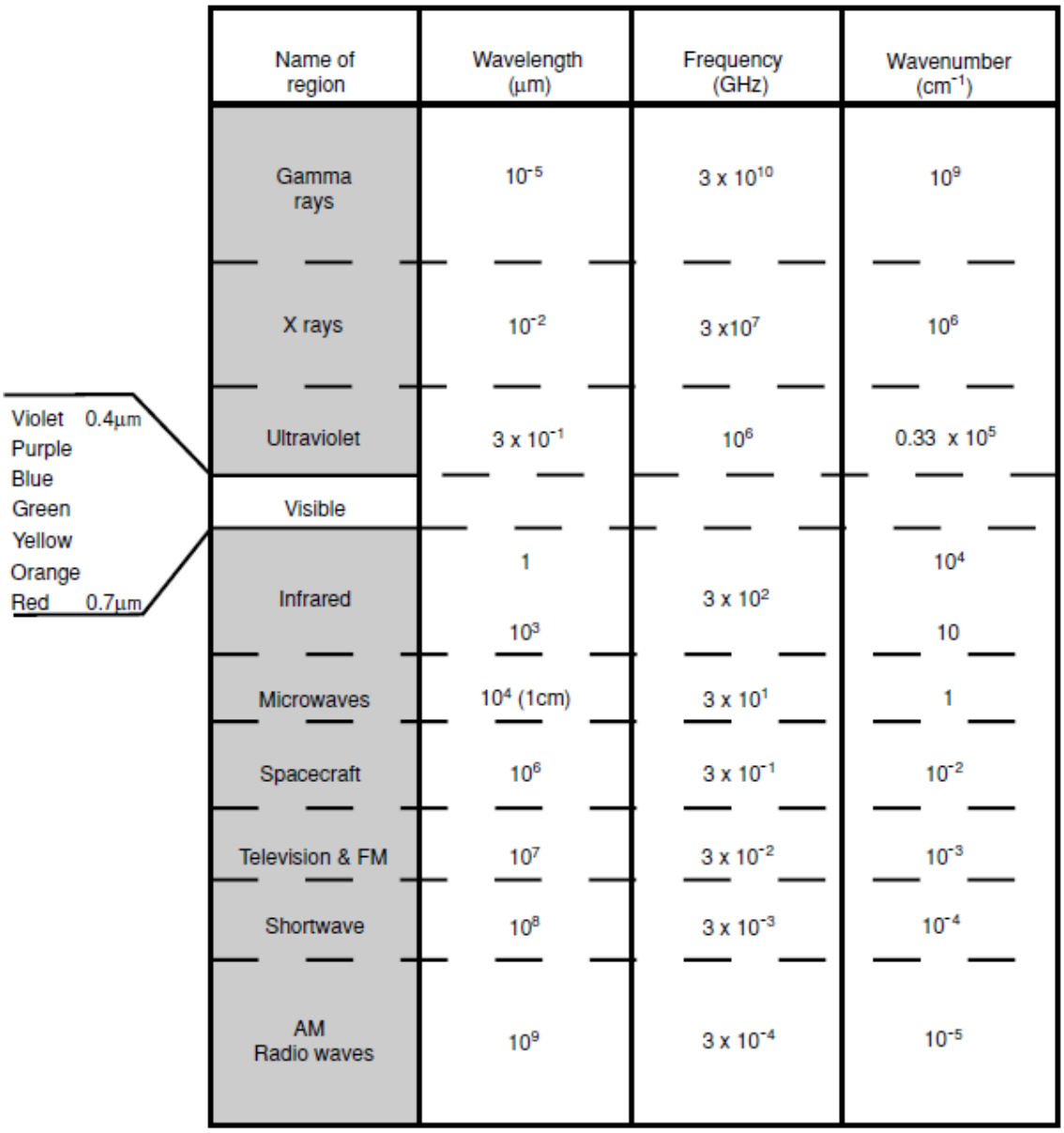


Figura 09: Espectro eletromagnético em termos de comprimento de onda, frequência e número de onda.
Fonte: Liou (2002).

A composição espectral da radiação solar muda consideravelmente durante o ciclo solar de 11 anos. Beer *et al.* (2000) apontam que a menor variação de intensidade ocorre na banda de maior emissão do espectro solar.

A maior variação de intensidade nos extremos do espectro de emissão solar contribui pouco para a variação total do fluxo energético, mas mesmo assim podem ter significativo impacto climático devido à atuação de fenômenos sensíveis a uma determinada banda espectral, como as moléculas de ozônio e oxigênio e nitrogênio atômicos na alta atmosfera, as quais absorvem bastante essa banda energética (BEER *et al.*, 2000; LIOU 2002).

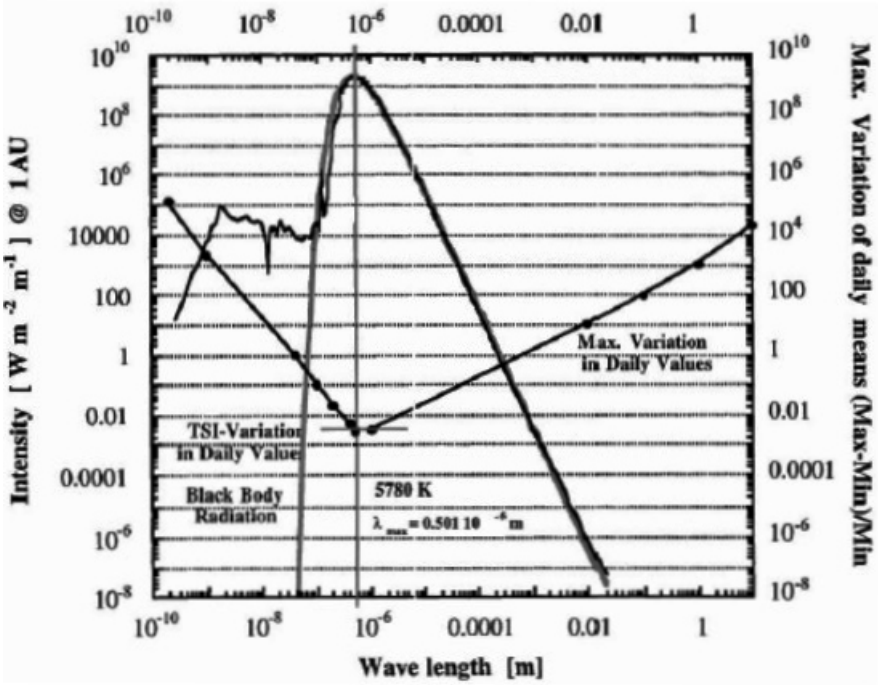


Figura 10: Variação diária de irradiância solar total por comprimento de onda.
Fonte: Beer *et al.* (2000).

A emitância radiante total pode ser encontrada pela Lei de Stefan-Boltzmann, integrando-se a emitância espectral:

$$\int_0^{\infty} E_{b\lambda}\, d\lambda = E \tag{5.4}$$

$$E = \sigma T^4 \tag{5.5}$$

Sendo:

E = emitância radiante total em W m^2;

$\sigma = 5{,}6697 \times 10^{-8}$ W m^2 K^{-4} (constante de Stefan-Boltzmann);

Já pela Lei de Wien pode-se determinar o comprimento de onda de máxima emitância espectral (λ_m):

$$\lambda_m = b / T \tag{5.6}$$

Onde a constante de deslocamento é dada como:

b = 2897,8 μm K;

Resolvendo a equação 5.6 para a temperatura superficial aproximada do Sol (5780K), considerando-o um corpo negro, vê-se que o pico de emissão solar se dá no comprimento de onda de 0,5 μm, que corresponde à luz visível de cor azul.

A lei de Lambert diz que um fluxo radiante (F) que incide sobre a superfície (S) em um ângulo (Z) com a normal, produz uma irradiância (I).

$$I = F / A2 \quad (5.7)$$

$$I_n = F / A1 \quad (5.8)$$

$$I = I_n A1 / A2 \quad (5.9)$$

$$I = I_n \cos (Z) \quad (5.10)$$

Sendo:

I_n = irradiância sobre superfície normal ao fluxo radiante;

A1 = área normal ao fluxo radiante;

A2 = área de incidência inclinada do fluxo radiante.

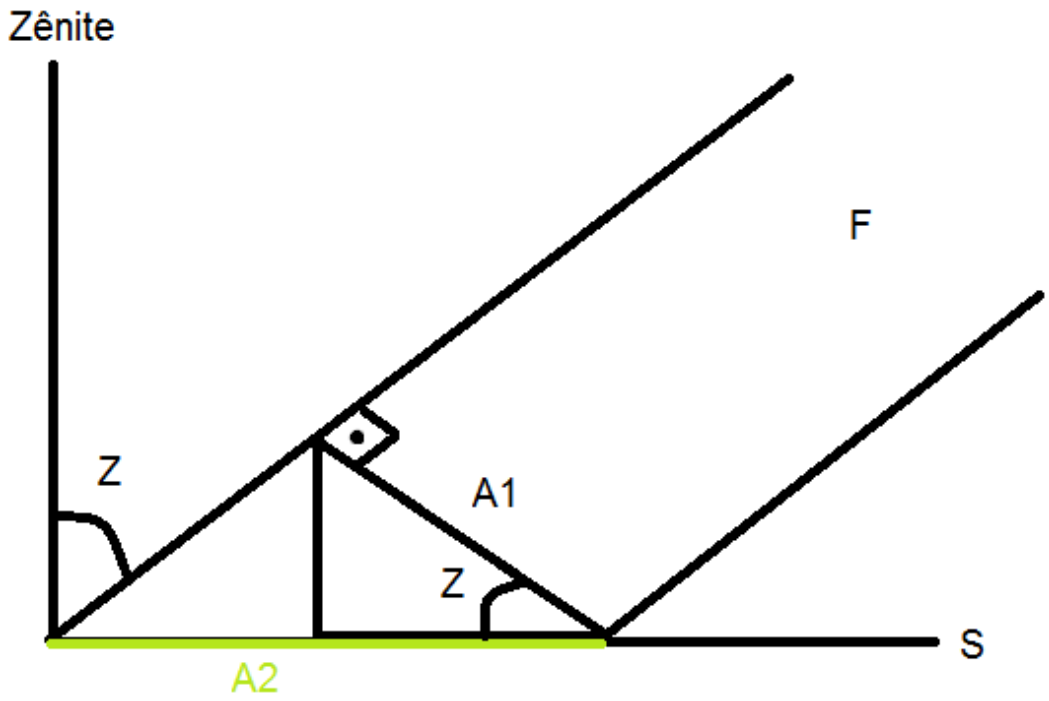


Figura 11: Ilustração da Lei de Lambert.
Fonte: Organizado pelo autor.

5.1.2 A constante solar

A constante solar (S) é a quantidade de energia solar incidente sobre o interior de uma superfície esférica de raio igual à distância média Terra-Sol (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001).

A emitância radiante (E_s) que deixa a superfície solar pode ser dada por:

$$\sigma T_s^4 = F_s / 4 \pi R^2 \quad (5.11)$$

Onde:

F_s = fluxo de radiação solar em j s^{-1};

T_s = temperatura da superfície solar;

R = 6,96 x 10^8 m (raio solar);

Considerando que a energia eletromagnética se propaga no vácuo e, portanto não sofre atenuação até atingir a Terra, o mesmo fluxo de radiação passará a irradiar uma área correspondente a uma esfera com raio igual à distância Terra-Sol.

A constante solar (S) pode ser encontrada então:

$$S = F_s / 4 \pi D_m^{\ 2} \quad (5.12)$$

$$S = \sigma T_s^4 R^2 / D_m^{\ 2} \quad (5.13)$$

Onde:

D_m = distância média Terra-Sol;

Recentes medições de satélite apontam para um valor de S = 1366 W m^{-2}, valor este muito próximo aos calculados anteriormente ao uso do sensoriamento remoto (LIOU, 2002).

A constante solar, entretanto, não é realmente constante. A variabilidade da irradiância solar total depende de uma combinação de fenômenos, como as manchas solares e as *plages*[3]. É extremamente difícil atribuir as variações observadas a um ou a alguns fenômenos específicos. Apenas com as recentes medições de satélites foi descoberto que a irradiância solar pode variar cerca de 0,1% entre o mínimo e o máximo do ciclo de 11 anos. Essa variação é considerada pouco significativa em um intervalo de tempo geologicamente curto, contudo, acumulam-se evidências de que sua variabilidade possua significativa influência nas mudanças climáticas passadas e presentes (BEER *et al.,* 2000).

Segundo Aumbaum (2010) há uma variação inferior a 1Wm^{-2} na constante solar devido ao ciclo solar de 11 anos, além das variações relevantes no tempo astronômico. Em geral, devido à excentricidade da órbita terrestre, a constante solar varia entre 1412 Wm^{-2} no começo de janeiro e 1321 Wm^{-2} no começo de julho.

Beer *et al.* (2000) apontam ainda que a quantidade de energia solar que chega à Terra não depende exclusivamente de propriedades do Sol, como a fusão nuclear em seu centro e o transporte de energia por radiação e convecção no interior do astro, mas também das condições de transmissão entre o Sol e a Terra, o que inclui a distância percorrida pela energia propagada.

[3] Zonas brilhantes da cromosfera solar as quais são associadas a fortes campos magnéticos. Costumam surgir associadas às manchas solares.

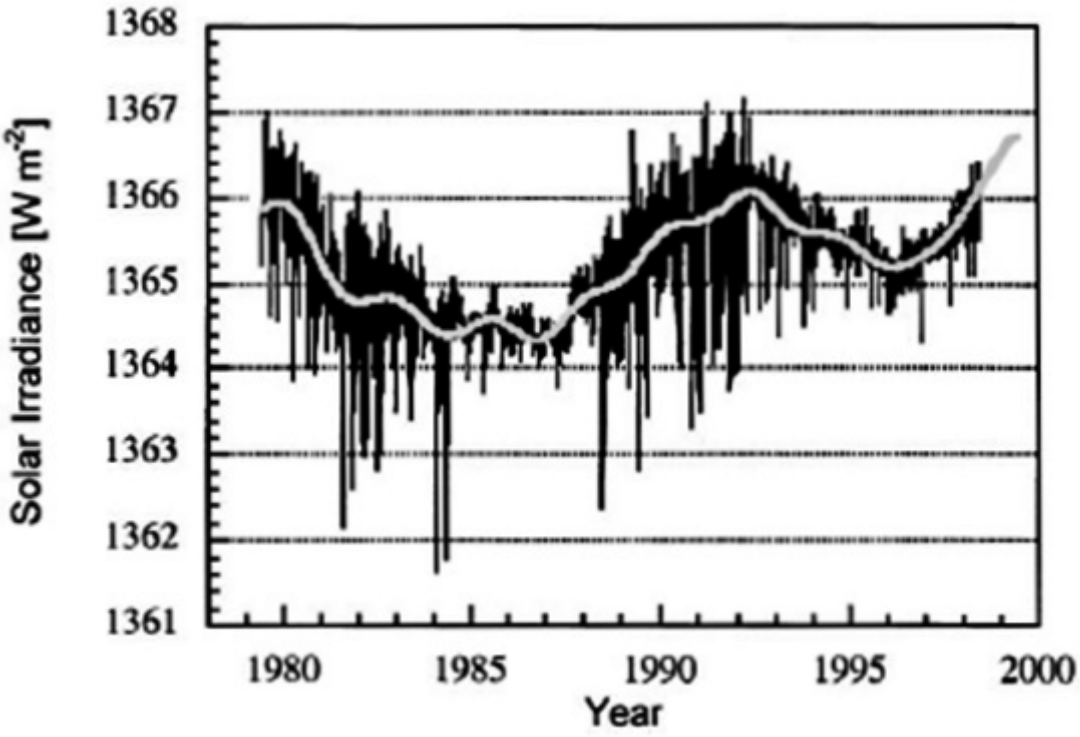


Figura 12: Irradiância solar medida a partir de dados dos satélites NIMBUS 7, ACRIM II e VIRGO.
Fonte: Beer *et al.* (2000).

5.1.3 Relações astronômicas entre a Terra e o Sol

A Terra é um planeta de órbita elíptica, ficando ora mais próxima do centro de sua órbita, ora mais distante. Contudo, faz-se relevante mencionar que a excentricidade atual dessa elipse é de aproximadamente 0,02. Essa excentricidade condiz com uma órbita praticamente circular (CANALLE, 2003).

Atualmente, o periélio, momento de maior proximidade ao Sol, ocorre em 3 de janeiro, no verão do hemisfério sul, ao passo que o momento de maior distanciamento, o afélio, acontece em 4 de julho, inverno no hemisfério sul. A distância média Terra-Sol é aproximada em 149,6 x 10^9 metros, sendo este valor denominado de unidade astronômica (UA) e correspondente à distância Terra-Sol nos dias 4 de abril e 5 de outubro, data dos equinócios (VIANELLO; ALVES, 1991).

Spencer (1971 *apud* Vianello e Alves, 1991) determinou expressões para calcular algumas variáveis astronômicas entre a Terra e o Sol:

$$(D_m / D)^2 = 1{,}000110 + 0{,}034221 \cos(x) + 0{,}001280 \operatorname{sen}(x) + 0{,}000719 \cos(2x) + 0{,}000077 \operatorname{sen}(2x) \quad (5.14)$$

$$\delta = 0{,}006918 - 0{,}399912 \cos(x) + 0{,}070257 \operatorname{sen}(x) - 0{,}006758 \cos(2x) + 0{,}000907 \operatorname{sen}(2x) - 0{,}002697 \cos(3x) + 0{,}001480 \operatorname{sen}(3x) \quad (5.15)$$

Onde:

D_m = Distância média Terra-Sol;

D = Distância Terra-Sol;

$x = 2\pi (n - 1) / 365$;

n = Dia do ano, variando de 1 a 365;

δ = Declinação solar (que atualmente varia entre 23°27’ e – 23°27’).

Considerando a superfície terrestre como uma esfera, através de relações de geometria esférica, podem ser calculados outros parâmetros importantes. Na figura abaixo, considerando o referencial de um observador sobre a superfície terrestre, no ponto A, o polo norte e o ponto S, ponto da superfície intersecionado pelo vetor que liga o Sol ao centro da Terra, obtêm-se o triângulo astronômico projetado sobre a superfície, utilizado para cálculos astronômicos e de navegação. Os lados do triângulo são arcos, sendo (90° - δ), (90° - φ) e o ângulo zenital solar (Z), formado entre a vertical do ponto de observação e o vetor que liga o Sol ao centro da Terra.

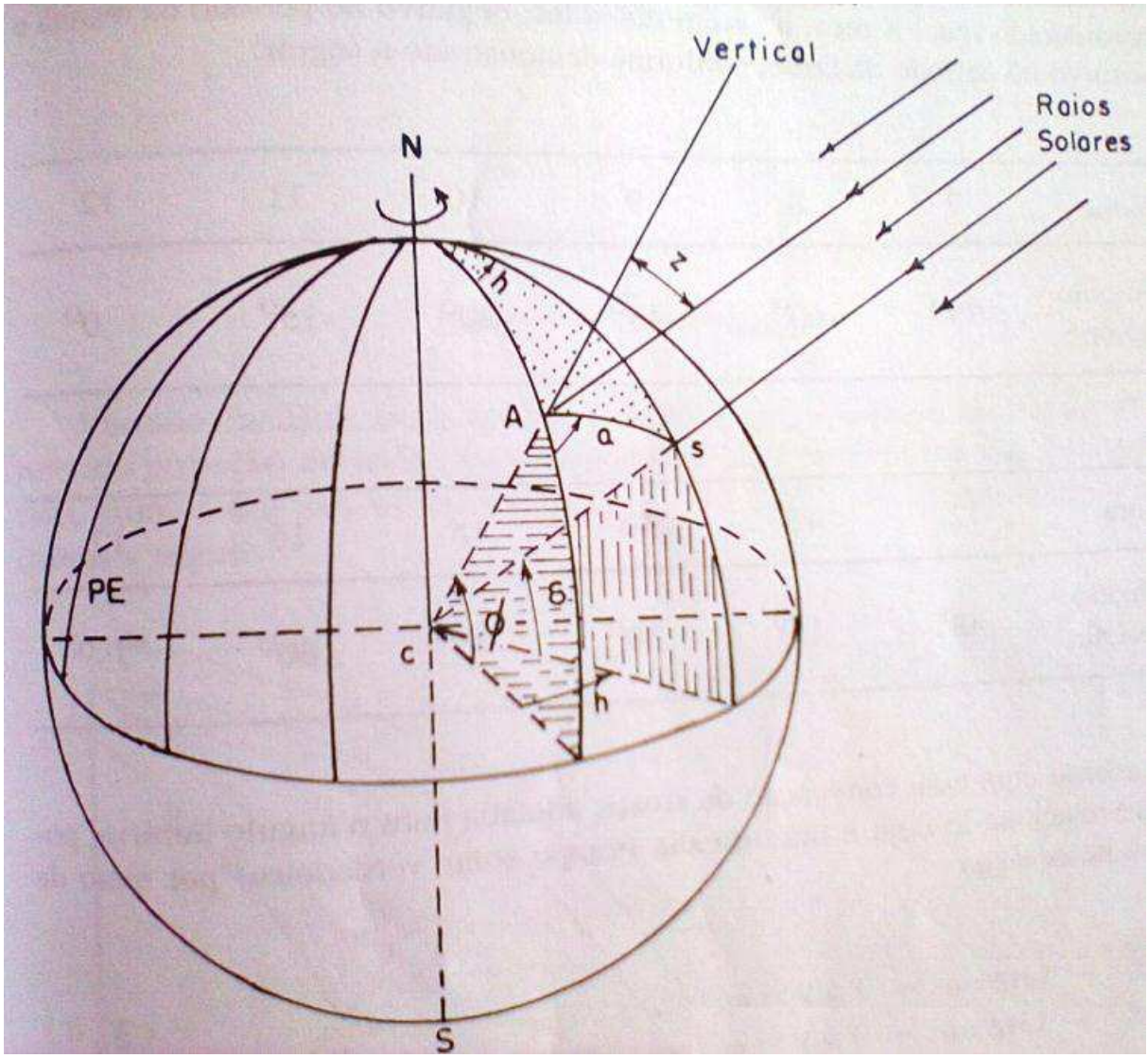


Figura 13: Triângulo astronômico projetado sobre a superfície esférica representativa da Terra.
Fonte: Vianello e Alves, (1991).

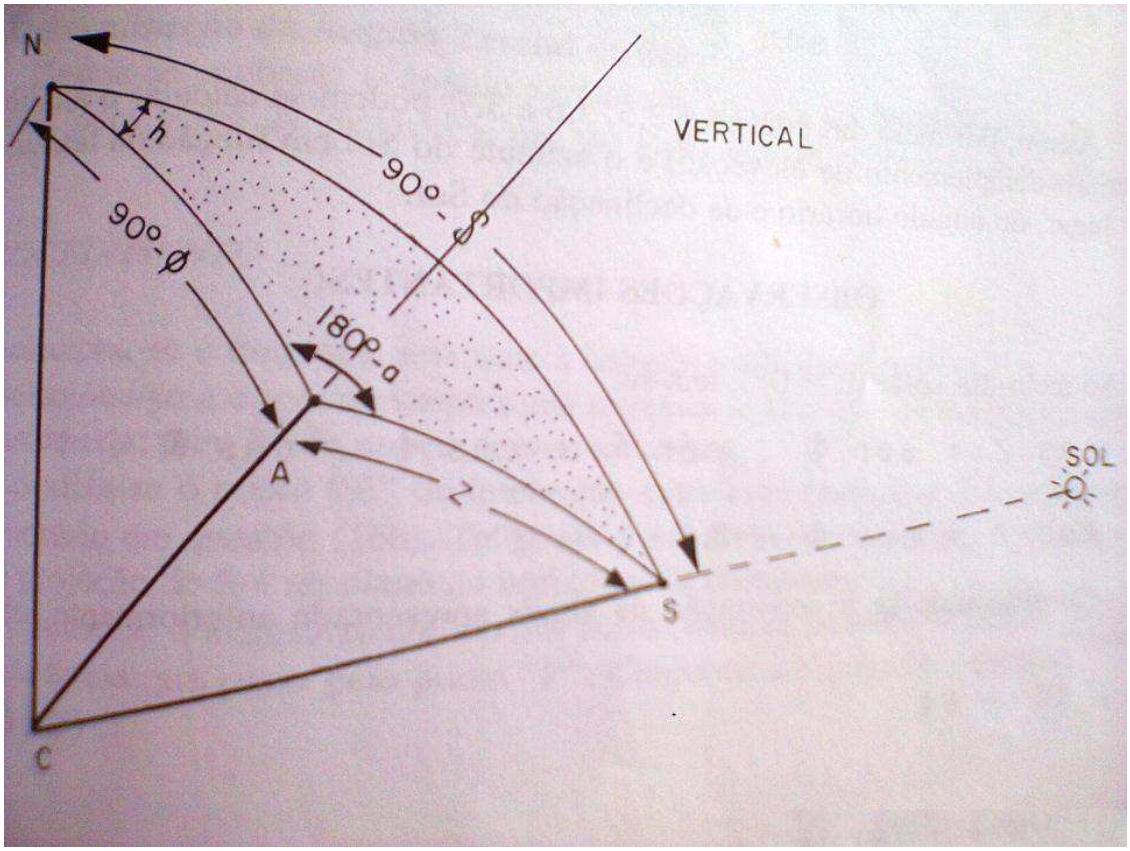


Figura 14: Triângulo esférico com posições relativas do observador e do Sol.
Fonte: Vianello e Alves, (1991).

O complemento do ângulo zenital solar é o ângulo de elevação solar (e). O observador na Terra, ao observar o Sol no céu, verá que este estará com uma elevação a partir do horizonte e com um ângulo zenital a partir do zênite do ponto de observação.

$$Z + e = 90° \qquad (5.16)$$

O ângulo horário h é aquele, no plano equatorial terrestre, entre os meridianos que passam pelos pontos A e S:

$$h = (\text{hora} - 12)\ 15 \qquad (5.17)$$

Sendo:

hora = horário local de observação;

h = ângulo horário.

A partir aplicação das leis do seno e do cosseno sobre o triângulo esférico, obtêm-se o ângulo zenital solar:

$$\cos(Z) = \text{sen}(\varphi)\ \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi)\ \cos(\delta)\ \cos(h) \qquad (5.18)$$

Onde:

φ = latitude local;

δ = declinação solar.

Os horários de alvorecer e de ocaso podem ser obtidos por:

$$\cos(H) = - tg(\varphi)\, tg(\delta) \quad (5.19)$$

O foto período (N), que é a duração astronômica do dia, pode ser obtido então pela expressão:

$$N = 2\, H / 15 \quad (5.20)$$

A figura abaixo mostra como a duração do período diurno varia de acordo com a latitude e o dia do ano. Na latitude 70°N há a ocorrência de dias mais longos no verão, chegando a haver dias com 24h de iluminação solar, ao passo em que no inverno pode haver noites que durem 24h.

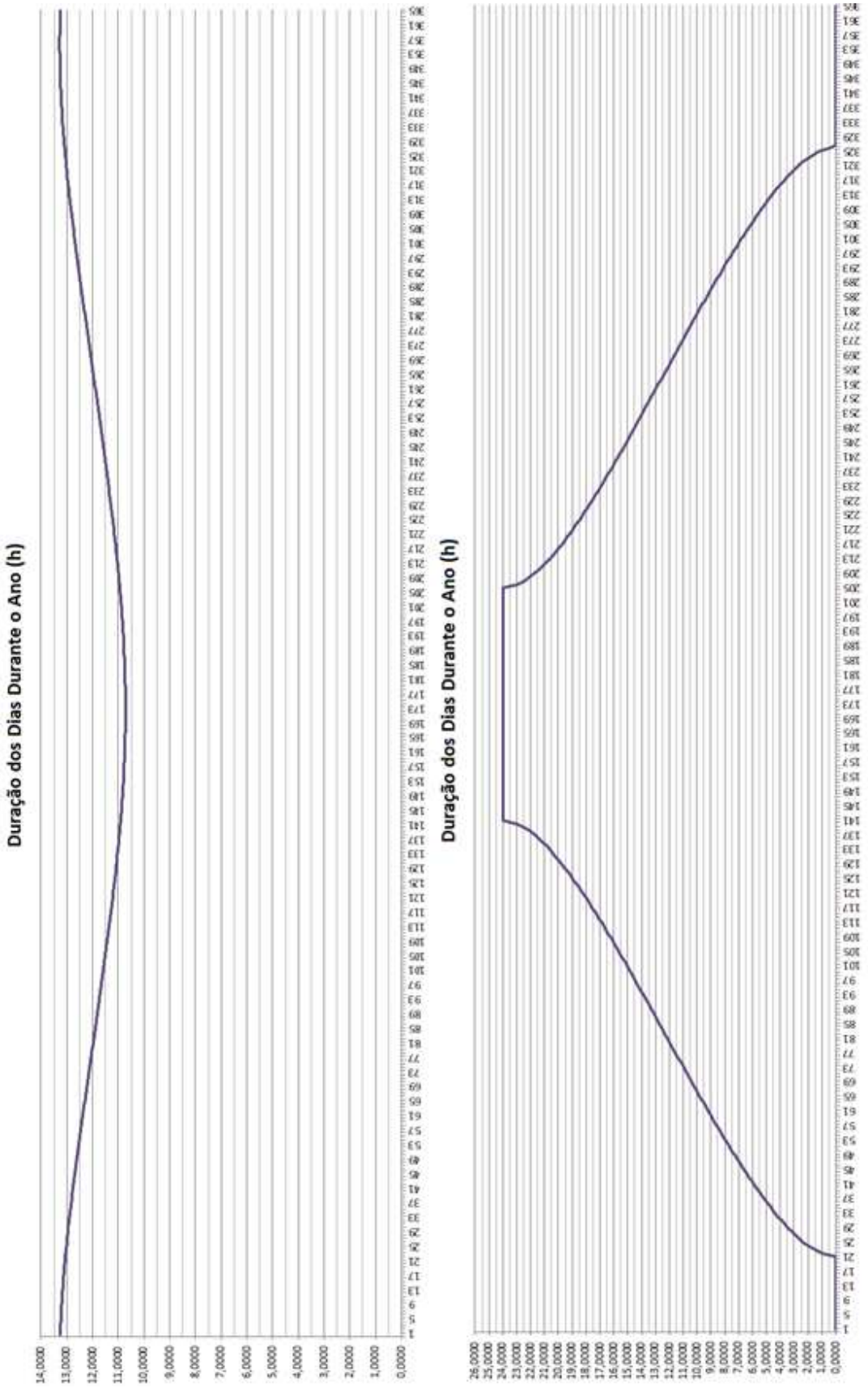


Figura 15: Duração dos dias em horas durante o ano nas latitudes 21°S e 70°N.
Fonte: Organizado pelo autor a partir de dados calculados com o programa Climasol (DUARTE, 2013).

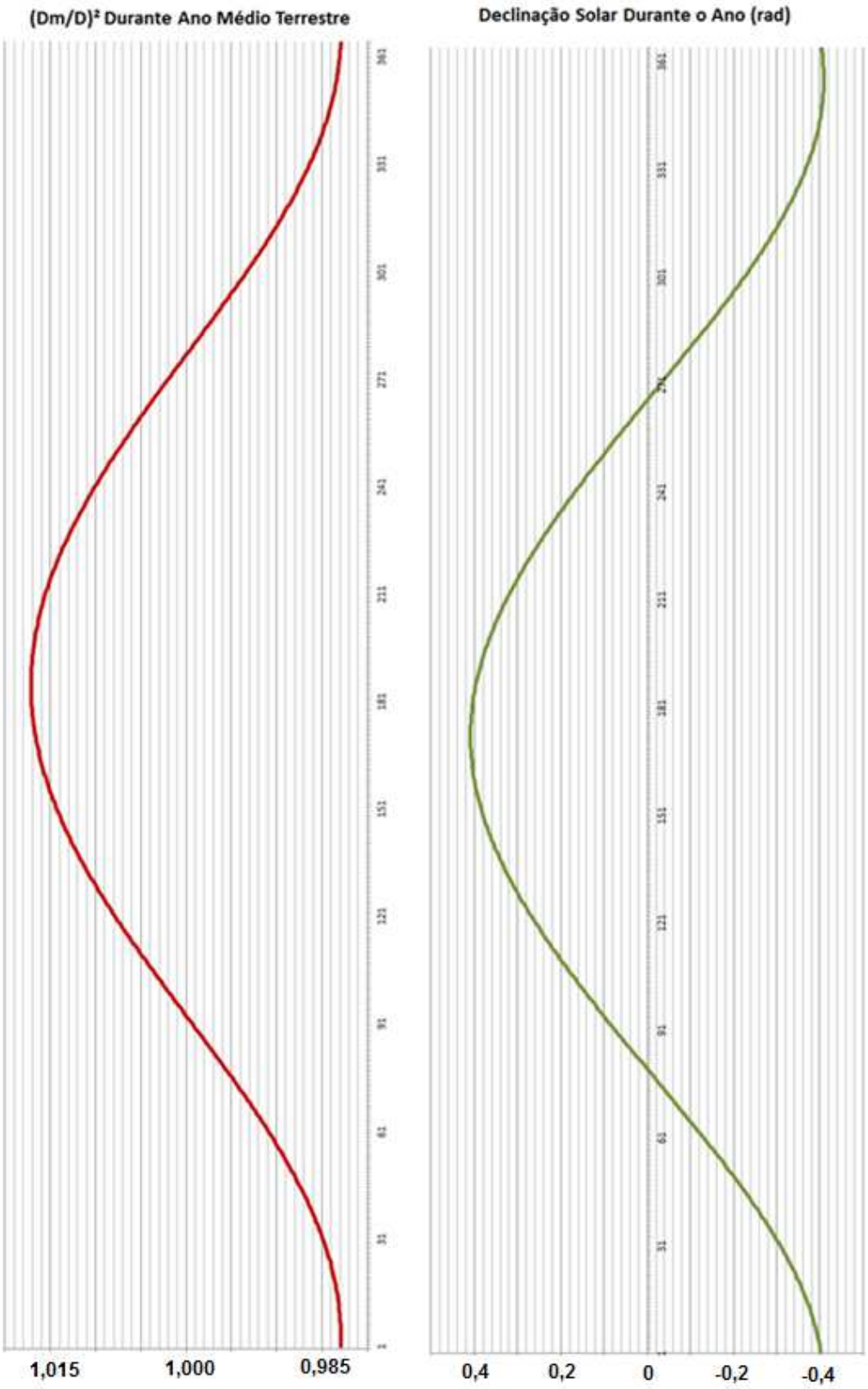


Figura 16: Variação anual de $(D_m/D)^2$ e declinação solar em radianos.
Fonte: Organizado pelo autor a partir de dados calculados com o programa Climasol (DUARTE, 2013).

5.1.4 Irradiância solar sobre a atmosfera

Considerando o Sol como uma fonte infinitamente distante, os raios solares atingem a atmosfera terrestre de forma paralela. Contudo, a Terra não é plana e sofre irradiação solar de forma desigual em sua superfície.

A irradiância solar instantânea (I') incidente sobre uma superfície plana tangente ao topo da atmosfera e normal ao fluxo radiante solar, de acordo com a lei de Lambert, é obtida por (VIANELLO; ALVES, 1991):

$$I' = S\,(D_m / D)^2 \cos(Z) \qquad (5.21)$$

Esta equação permite demonstrar a ocorrência dos períodos diurno e noturno, uma vez que, desconsiderando a refração atmosférica, valores negativos de I' indicam que uma determinada latitude, em um determinado horário, não está sendo irradiada, pois o Sol encontra-se do outro lado do planeta Terra.

Para obter a irradiância solar diária (Io) incidente sobre a atmosfera terrestre, integra-se a equação acima em função do tempo, no intervalo de nascer (t') ao pôr do Sol (t).

$$Io = \int_{t'}^{t} 1366\,(Dm/D)^2\,(\text{sen}\,\varphi\,\text{sen}\,\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos h) \qquad (5.22)$$

Consideram-se a distância Terra-Sol e a declinação solar como constantes para um determinado dia. Usando a relação entre o tempo (t) e a velocidade angular (ω) de rotação da Terra:

$$\omega = dh / dt \qquad (5.23)$$

Sendo:

$\omega = 2\,\pi$ rad / dia.

Integrando a equação de -H a +H, horários de nascer e de pôr do sol:

$$Io = 1366\,(Dm/D)^2\,1/\omega\,\left(\text{sen}\,\varphi\,\text{sen}\,\delta \int_{-H}^{+H} dh + \cos\varphi\,\cos\delta \int_{-H}^{+H} \cos h\,dh\right) \qquad (5.24)$$

Tendo um dia 86400 segundos:

$$Io = 1366\,(Dm/D)^2\,(86400/\pi)\,(h\,\text{sen}\,\varphi\,\text{sen}\,\delta + \cos\varphi\cos\delta\,\text{sen}\,h) \qquad (5.25)$$

Esta equação permite então o cálculo da irradiância solar sobre o topo da atmosfera para uma determinada latitude em um determinado dia do ano. Através dela pode-se demonstrar a ocorrência das estações do ano, as quais acontecem devido à distribuição desigual de energia solar sobre a Terra.

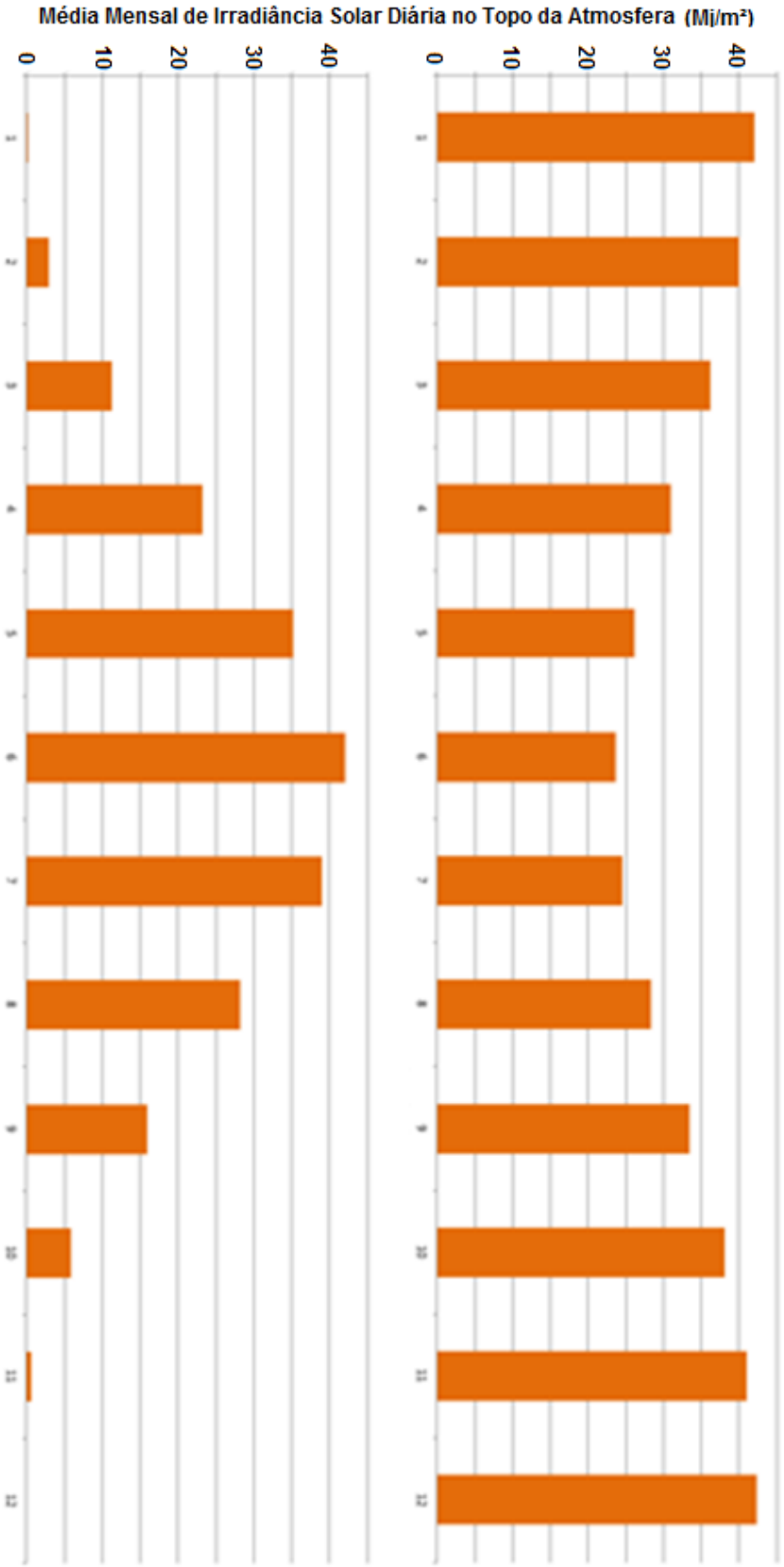


Figura 17: Irradiância solar diária média de cada mês para as latitudes 21° S e 70° N.
Fonte: Organizado pelo autor a partir de dados calculados com o programa Climasol (DUARTE, 2013).

5.1.5 Os ciclos de Milankovitch

A distância média entre a Terra e o Sol, embora seja considerada constante para um intervalo temporal geologicamente curto, é uma função da excentricidade da órbita planetária. Essa variável, se considerada no tempo geológico, acarreta mudanças diretas na irradiância solar sobre a atmosfera terrestre. Por sua vez, a constante solar também não é constante no tempo geológico, pois é função da distância Terra-Sol.

A declinação solar, que compõe a posição do Sol em relação à Terra, embora seja anualmente cíclica, é uma função do ângulo oblíquo entre o eixo de rotação terrestre e o eixo normal ao plano equatorial celeste. Essa obliquidade varia em ciclos de duração de milhares de anos. Dessa forma, a distribuição irregular de radiação solar sobre o planeta pode ficar mais ou menos irregular no tempo geológico.

A excentricidade (e) é a relação entre os dois semieixos de uma elipse, o maior (a) e o menor (b):

$$e = (a^2 - b^2)^{1/2} / a \qquad (5.26)$$

Uma excentricidade igual a zero indica uma órbita circular. Quanto maior o valor da excentricidade, mais anômala será a órbita do planeta. A órbita da Terra é bastante próxima de ser circular, variando entre 0,01 e pouco mais de 0,04 (LIOU, 2002).

Segundo Liou (2002) a declividade δ pode ser obtida em função da obliquidade (ε), a qual varia entre 22° e 24,5° em um período de 41 mil anos:

$$\text{sen}(\delta) = \text{sen}(\lambda)\ \text{sen}(\varepsilon) \qquad (5.27)$$

Onde:

λ = longitude verdadeira da Terra, contada a partir do ponto vernal no sentido anti-horário;

ε = ângulo entre o polo norte da Terra e o polo norte celeste.

O valor atual de ε é cerca de 23,45°, correspondendo à metade da amplitude aproximada de δ, que varia entre 23,45° e -23,45° durante o ano.

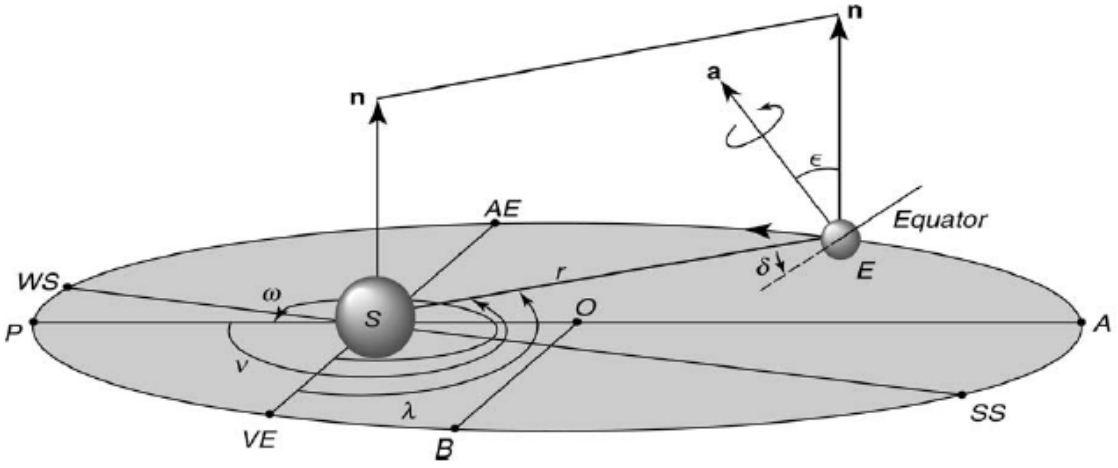


Figura 18: Geometria entre a Terra e o Sol. O disco cinzento representa o plano equatorial celeste. *P* representa a posição do periélio e *A* do afélio. *VE* e *AE* representam, respectivamente os equinócios vernal e outonal. *WS* e *SS* são os solstícios de inverno e verão, respectivamente, para o hemisfério norte. Os vetores **n** são normais ao equador celeste, já o vetor **a** é paralelo ao eixo de rotação terrestre. O ângulo δ é a declinação solar, ε é o ângulo oblíquo do eixo de rotação, ϑ é a anomalia verdadeira da Terra para um dado tempo em relação ao periélio, ω é a longitude do periélio em relação ao ponto vernal, λ é a longitude do planeta em relação ao ponto vernal. *O* é o centro da elipse, *OA* é o semi-eixo maior, *OB* é o semieixo menor, *S* é a posição do Sol, *E* é a posição da Terra e *r* é a distância entre a Terra e o Sol.
Fonte: Liou (2002).

Tabela 02: Diferença de radiação solar incidente sobre a latitude 45°S durante o verão e o inverno em decorrência de uma mudança na amplitude da declinação, ocorrida devido a uma suposta alteração na obliquidade.

Declinação (δ) em graus	**23,37**	**-23,37**	**22,91**	**-22,91**	**23,5**	**-23,5**
Irradiância (Io) em Mj/m²	9,89	44,77	10,1	44,46	9,47	44,87
Δ Io em Mj/m²	34,88		34,36		35,4	

Fonte: Organizado pelo autor.

A tabela acima mostra como, em decorrência de alterações na obliquidade, as diferenças de temperatura entre verão e inverno podem ser alteradas.

O movimento de precessão é uma perturbação no momento rotacional terrestre causado pela influência da Lua e do Sol. É um giro cônico do eixo de rotação terrestre em torno do polo norte celeste, causando anualmente um atraso no momento em que o planeta cruza o ponto vernal. Isso faz com que as estações climáticas ocorram em datas diferentes a cada ano, como se o plano da eclíptica girasse.

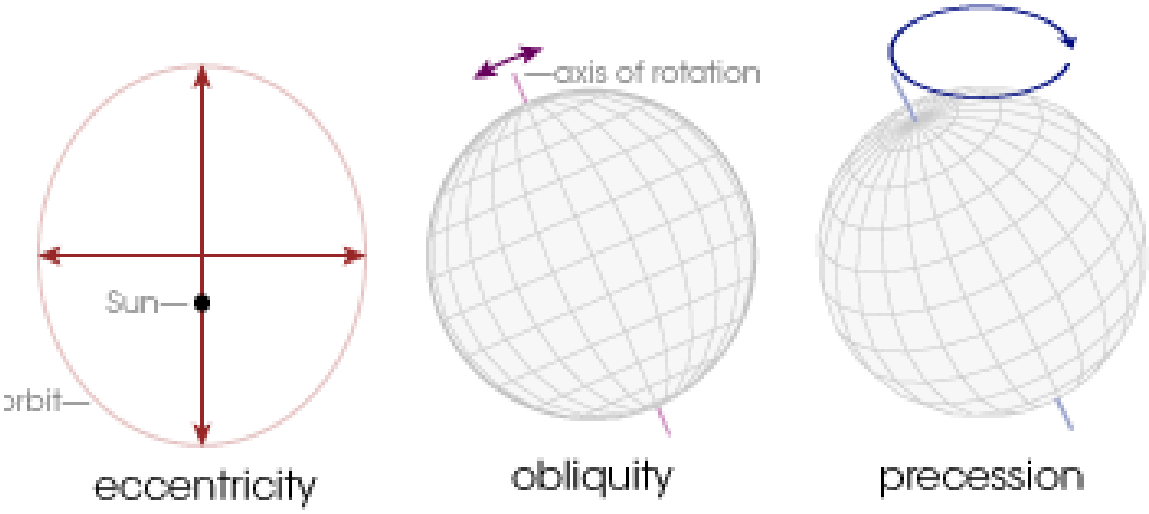


Figura 19: Variações da geometria entre a Terra e o Sol.
Fonte: Holli Riebeek (2006).

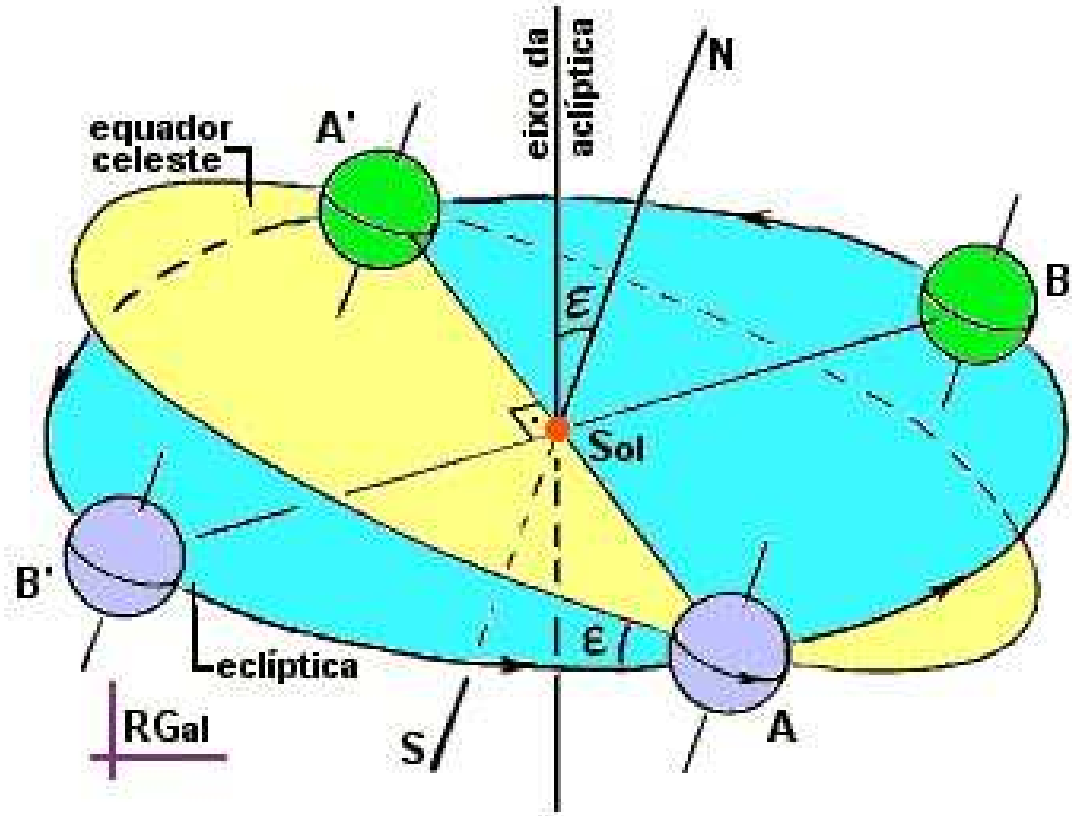


Figura 20: Posição relativa entre o plano equatorial celeste e o plano da eclíptica, que é o plano orbital terrestre.
Fonte: Netto (2013).

O primeiro a sintetizar uma teoria que demonstrasse matematicamente como a mecânica dos movimentos da Terra podia refletir em seu clima ao longo do tempo astronômico foi o cientista sérvio Milutin Milankovicth. Ele utilizou formulações sobre a mecânica celeste de cientistas anteriores, desde Kepler, para computar a excentricidade e a obliquidade da órbita terrestre, além da

precessão dos equinócios. A partir desses dados, pôde calcular a variação de irradiância solar sobre a atmosfera terrestre ao longo do tempo geológico.

Milankovicth determinou que a excentricidade varia em um ciclo de 123 a 95 mil anos – aproximadamente 100 mil anos – e um ciclo de 412,8 mil anos. O movimento de precessão varia em ciclos de aproximadamente 19 e 23 mil anos, enquanto a obliquidade varia em um ciclo de 41 mil anos. André Berger, renomado cientista belga que produziu diversos estudos sobre a teoria astronômica de mudanças climáticas, concluiu que essas variações orbitais são quase periódicas com variações de amplitude e não podem ser descritas adequadamente por sistemas lineares (SCHWARZACHER, 1993). Ou seja, são ciclos muito complexos que, embora ofereçam boa previsibilidade de frequência, apresentam certa variação na intensidade.

De acordo com a teoria de Milankovitch, a expansão das capas polares se deve à ocorrência de verões brandos nas altas latitudes, nas quais as temperaturas de verão seriam insuficientes para derreter a neve e o gelo acumulados durante o inverno. Invernos amenos proporcionariam um nível de precipitação suficiente para acumular mais neve, a qual aumentaria o albedo local e proporcionaria maior reflexão da radiação solar (SCHWARZACHER, 1993).

Uma sequência de verões frescos com invernos pouco rigorosos causaria uma queda da temperatura global e daria início um ciclo de retroalimentação, podendo desencadear uma glaciação. A expansão das capas de gelo se iniciaria sobre os continentes, devido ao efeito da continentalidade. Por isso as glaciações que marcam o período Pleistoceno são caracterizadas pelo crescimento de placas de gelo sobre massas continentais em altas latitudes, como na América do Norte e na Antártica atuais.

Nas latitudes baixas e médias, até 60°, o movimento precessional se mostra o mais influente no clima, enquanto nas altas latitudes, a obliquidade é o fator dominante (BERGER; PESTIAUX, 1984 *apud* SCHWARZACHER, 1993). Estudos de diversos cientistas posteriores a Milankovitch apontam que a excentricidade é o fator orbital menos influente no clima terrestre, devido a sua pequena variação.

Datações de isótopos estáveis de carbono e de oxigênio, muito utilizados em estudos paleoclimáticos e paleoceanográficos, reforçaram a teoria de Milankovitch na medida em que seus resultados mostravam forte correlação com as frequências previstas pela teoria orbital de mudanças climáticas. Mesmo diante da validade da teoria, a variação de irradiância solar prevista na mesma não é suficiente para, sozinha, explicar as mudanças climáticas passadas ou para prever as futuras. Algumas discrepâncias encontradas entre os dados obtidos por datação e os modelos orbitais indicam que outros fatores atuam conjuntamente nas alterações climáticas globais. Algumas mudanças climáticas ocorrem com diferença de fase dos ciclos orbitais, mostrando que alguns mecanismos climáticos possuem um tempo de resposta mais longo (SCHWARZACHER, 1993).

Mörner (1981, *apud* Suguio e Suzuki, 2010) evidencia que não somente efeitos paleoclimaticos podem ser verificados diante das mudanças orbitais, mas também paleogeodésicos e paleomagnéticos.

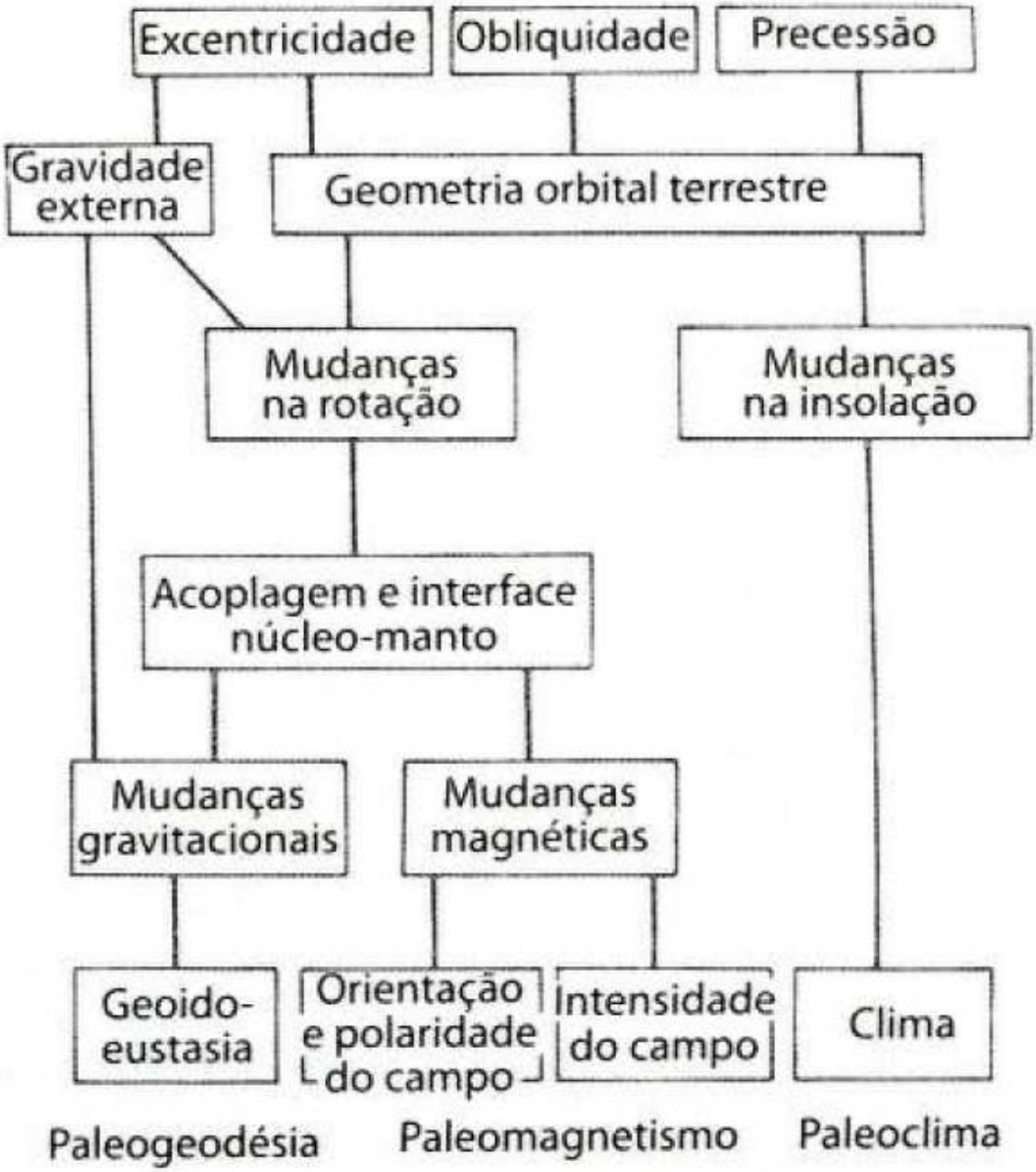


Figura 21: Efeitos das mudanças orbitais sobre a Terra.
Fonte: Mörner (1981. *apud* Suguio, 2010).

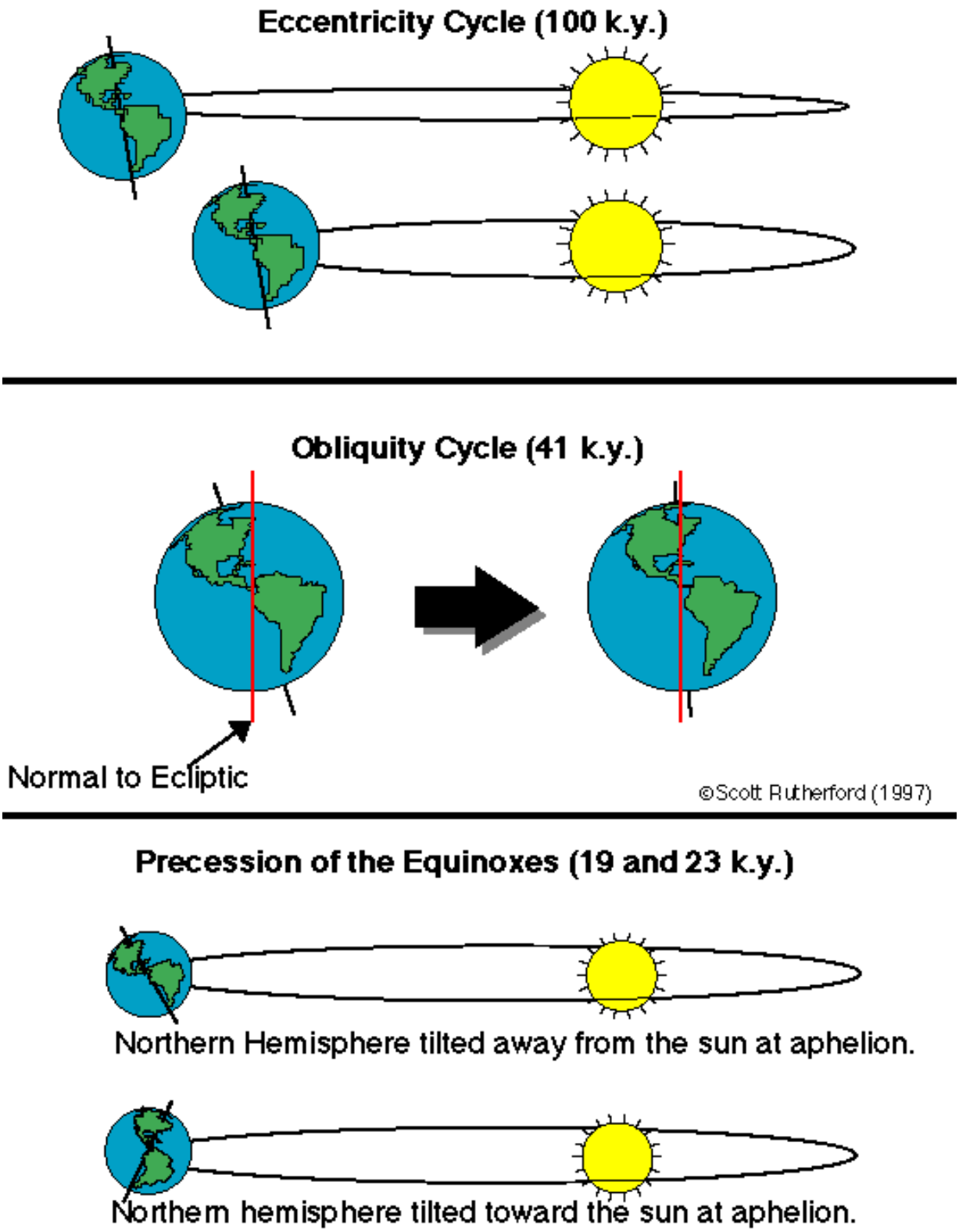


Figura 22: Ciclos de Milankovitch.
Fonte: Rutherford (2000).

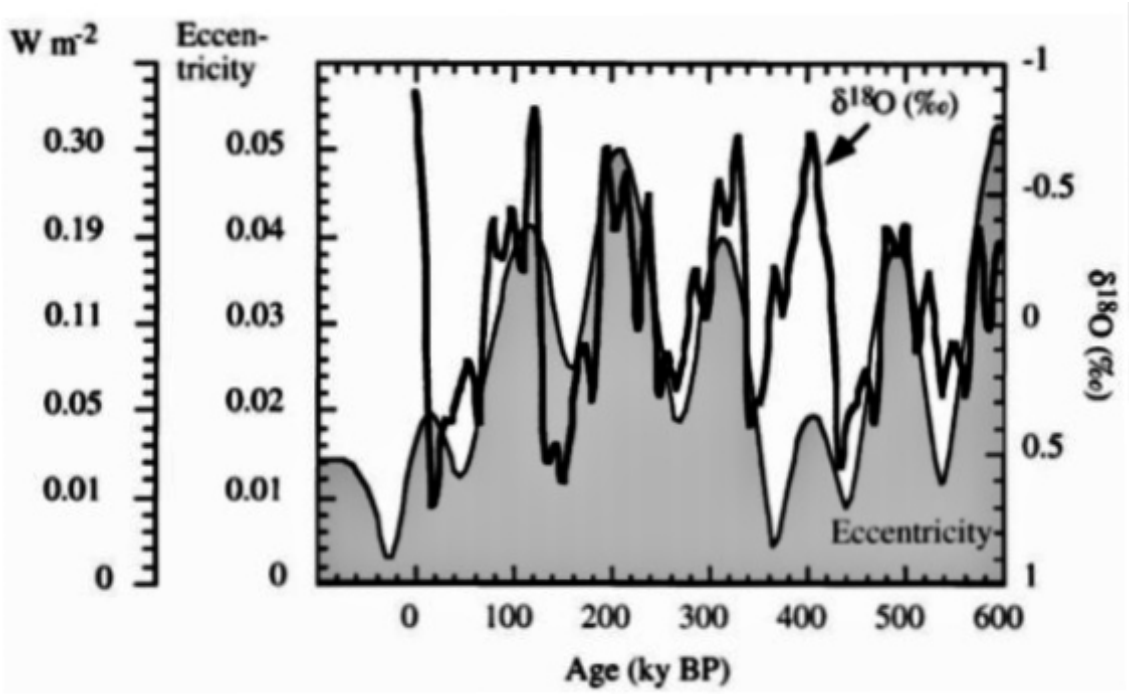


Figura 23: Comparação da excentricidade calculada com registros de $\delta^{18}O$ (SPECMAP).
Fonte: Imbrie, 1993 *apud* Beer *et al.*, (2000).

Beer *et al.* (2000) chamam atenção para como o ciclo de 100 mil anos se mostra fortemente correlacionado aos registros de $\delta^{18}O$, exceto no período de 400 mil anos atrás e nos últimos 20 mil anos. Essa correlação é contrastante com as pequenas variações de radiação solar induzidas pela forçante orbital, o que evidencia que não há uma relação linear entre as mudanças orbitais e o clima terrestre, provavelmente havendo outras variações desencadeadas pelas mudanças orbitais que venham a atuar conjuntamente com a variação na irradiância solar.

5.1.6 Manchas solares

As manchas solares são o mais conhecido fenômeno solar, devido ao seu ciclo médio de 11 anos e por poder ser facilmente observado a partir da Terra. O número máximo de manchas ocorre com aproximadamente 4,6 anos a partir do início do ciclo, enquanto o mínimo ocorre nos 6,4 anos decorrentes. Entretanto, uma vez que no período entre 1645 e 1715 houve um registro de manchas solares muito abaixo da média, conhecido como mínimo de Mauder, especula-se que haja um ciclo simultâneo mais longo (RODRIGUES, 2000).

As manchas solares são regiões mais frias da fotosfera, tendo em média 4000K, associadas a um forte campo magnético e que muitas vezes surgem em pares de polaridades opostas ou em grupos, sempre em médias e baixas latitudes solares (LIOU, 2002).

Muitas vezes as manchas podem ser vistas cercadas por regiões de alto brilho e campo magnético intenso, embora menos intenso que o das manchas, chamadas fáculas. As manchas também podem se desenvolver dentro de

extensas zonas brilhantes chamadas *plages,* as quais são associadas a fortes campos magnéticos.

Uma vez que as manchas solares são regiões mais frias, poder-se-ia deduzir que quando há maior número das mesmas há menor irradiação, logo provocando resfriamento na Terra. Contudo, as fáculas e *plages* proporcionam uma irradiância solar maior por terem maior extensão do que as manchas solares. Estas surgem no período de maior atividade solar, portanto, um período mais energético.

As evidências mostram que a variação na irradiância solar devido à presença das manchas não é suficiente para explicar as variações de temperatura na Terra. Durante a década de 1990, diversos cientistas apontaram para a correlação entre o número de manchas e a variação de temperatura terrestre, sem, contudo, encontrar uma explicação física plausível para tal efeito (ONÇA, 2008).

Estima-se que o aumento de fluxo radiante no pico do ciclo seja de aproximadamente 1%, de forma que, para incorrer em efeitos climatológicos significativos, as interações decorrentes na Terra seriam não lineares e possivelmente não imediatas. O período do mínimo de Mauder é inclusive associado a um período de resfriamento na Terra (RODRIGUES, 2000).

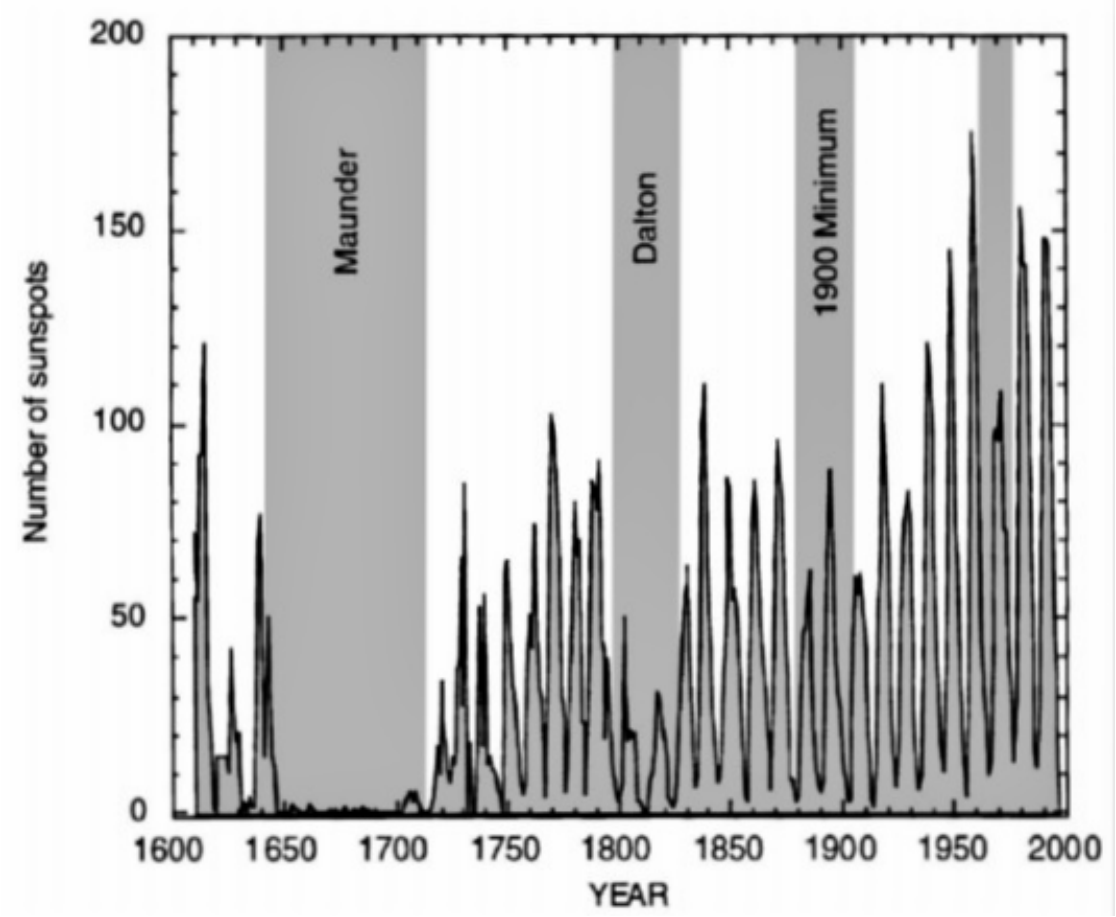


Figura 24: Registro de manchas solares. As áreas sombreadas mostram os períodos de menor atividade. Uma tendência ascendente pode ser vista a partir do Mínimo de Maunder.
Fonte: (HOYT; SCHATTEN, 1998 *apud* BEER *et al.*., 2000).

5.2 Energia geotérmica

Outra fonte de energia da Terra é o seu núcleo, o qual costuma ser descrito em duas partes: uma externa de natureza fluida – composta por ferro, enxofre, níquel e oxigênio – e outra sólida, composta por ferro, enxofre e níquel. Apesar das temperaturas elevadas, a pressão faz com que o material do núcleo interno permaneça em estado sólido. O níquel e o ferro são os elementos químicos mais abundantes em todo o núcleo terrestre (SUGUIO; SUZUKI, 2010).

O núcleo do planeta emite calor através de cinco processos principais (SALAMUNI, 2013):

- Calor residual do processo de agregação que originou o planeta há 4,5 bilhões de anos. Os inúmeros e intensos choques entre os corpos sólidos que originaram a Terra geraram calor suficiente para iniciar os processos nucleares com o passar do tempo geológico. Esse calor gerado ainda é emitido a partir do núcleo;
- Calor gerado pelo decaimento radioativo de elementos como ^{235}U, ^{238}U, ^{232}Th e ^{40}K. A desintegração dos núcleos de átomos desses elementos é a principal fonte de calor do núcleo;
- Calor latente da cristalização do núcleo externo, o qual libera calor ao mudar para o estado sólido no decorrer do tempo geológico;
- Calor gerado pelo atrito entre as diferentes camadas terrestres, as quais possuem velocidades diferentes em relação à rotação da Terra;
- Calor produzido pelo efeito de maré, uma vez que as forças gravitacionais do Sol e da Lua alongam e comprimem constantemente o material rochoso do interior do planeta, produzindo calor.

O vulcanismo, as atividades sísmicas, o movimento das placas tectônicas, o metamorfismo e a orogenia são fenômenos controlados pelo fluxo de calor interno da Terra (MIRANDA, *et al.*, 2000). Uma vez que a posição dos continentes pode modificar a circulação oceânica, a área continental emersa, o tamanho das bacias oceânicas e até mesmo o albedo global, fica evidente que a energia interna do planeta influencia em seu clima. O vulcanismo também apresenta um papel significativo no clima global. Já as cadeias montanhosas têm uma influência no clima regional, seja pelo efeito da altitude, seja pelo condicionamento da pluviosidade.

O transporte de calor no interior da Terra ocorre devido aos processos de condução e de convecção. Enquanto a condução é um processo lento de transferência de calor entre as moléculas, ocorrendo principalmente nos sólidos. Já a convecção é um transporte mais rápido de energia, que age através da movimentação de massas fluidas (PACCA; MCREATH, 2000).

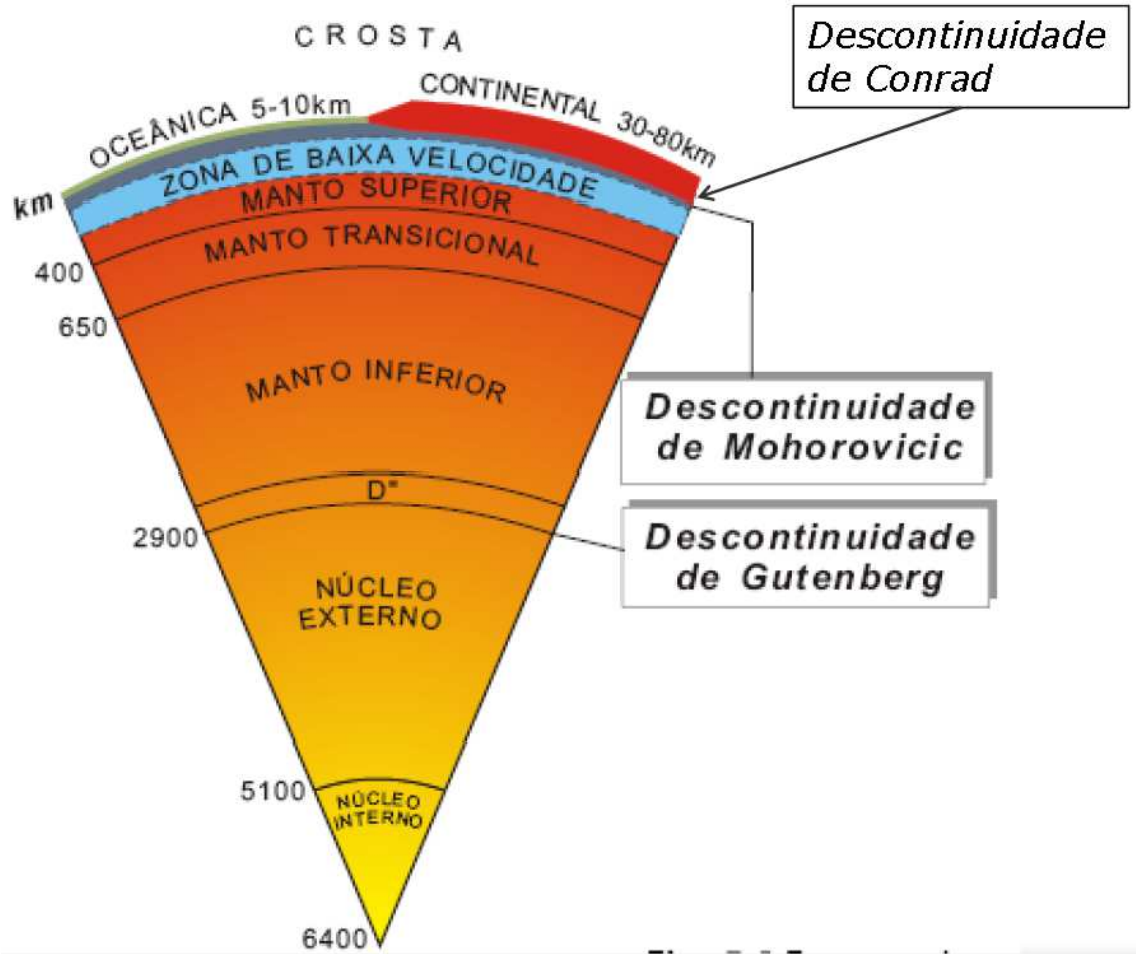


Figura 25: Camadas do interior da Terra.
Fonte: Salamuni (2013).

A diferença de temperatura entre o núcleo interno e o externo cria correntes de convecção no núcleo, as quais transportam calor para a porção mais externa do núcleo. Essas correntes, em conjunto com a rotação da Terra, criam o campo magnético terrestre. Da mesma forma, a diferença de temperatura entre o núcleo externo e o manto cria correntes de convecção no manto, as quais transportam energia para a astenosfera. A convecção na parte superior do manto movimenta as placas tectônicas. Apenas uma pequena parte da energia interna da Terra é dissipada em superfície através dos processos de vulcanismo e dos terremotos. (SUGUIO; SUZUKI, 2010).

Através da Lei de Fourrier para condução de calor, pode-se determinar um fluxo de calor (Q) em um meio com uma determinada variação de temperatura (ΔT):

$$\mathbf{q} = -k\,\mathbf{\Delta T} \qquad (5.28)$$

Onde:

q = vetor fluxo de calor em W m^{-2};

k = condutibilidade térmica do meio em W m^{-1} K^{-1};

ΔT = vetor variação de temperatura em K.

Considerando o caso unidimensional onde o fluxo é vertical e constante:

$$q = -k\ dt / dz \qquad (5.29)$$

Sendo:

q = fluxo de calor em W m^{-2};

dt / dz = derivada da temperatura em função da profundidade, em K m^{-1}.

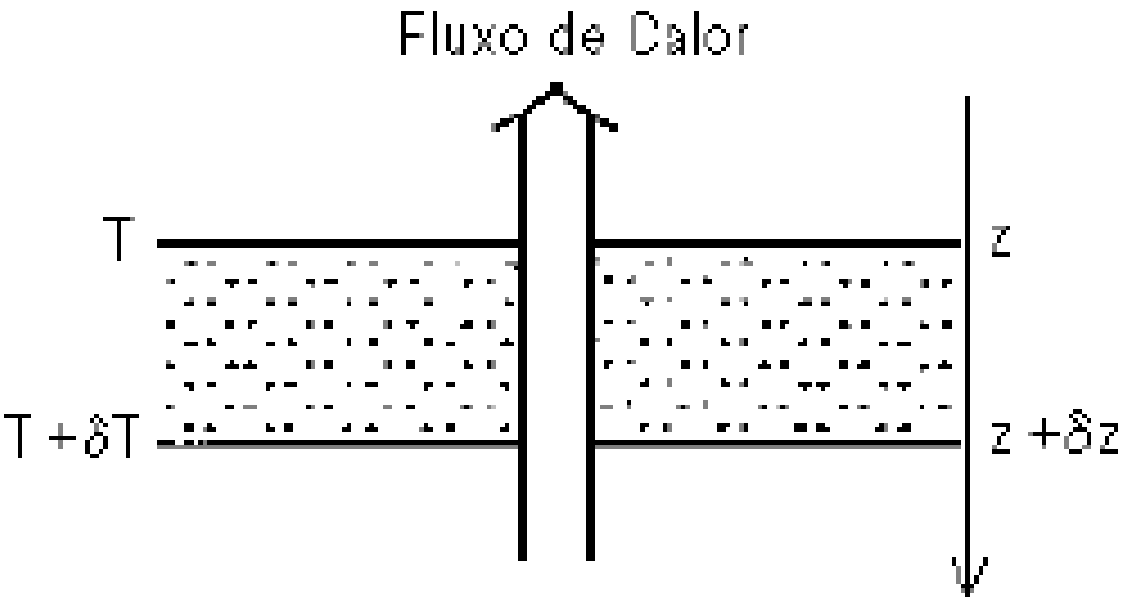


Figura 26: Condução de calor em meio sólido.
Fonte: Miranda *et al.* (2000).

Derivando-se a expressão do fluxo de calor em função da profundidade obtêm-se uma variação de potência por volume em W m^{-3}:

$$dq / dz = -k\ d^2t / dz^2 \qquad (5.30)$$

Pode-se reescrever esta equação na seguinte forma:

$$k\ d^2t / dz^2 = \rho\ Q \qquad (5.31)$$

Onde:

ρ = massa específica do material em kg m^{-3};

Q = produção de calor por unidade de massa em W kg^{-1}.

Após algumas integrações, Miranda *et al.* (2000) concluíram que é possível calcular a temperatura em uma determinada profundidade através da seguinte expressão:

$$T = T_s + q_s z k^{-1} - \rho Q z^2 (2k)^{-1} \quad (5.32)$$

Esse modelo permite a determinação de curvas geotérmicas, as quais são satisfatoriamente aplicáveis para a crosta terrestre, onde o transporte de calor se dá principalmente por condução. Para o manto, na presença de material fluido, esse modelo não se mostra adequado para determinação de temperaturas.

Pacca e McReath (2000) consideram que o fluxo geotérmico pode ser definido como o produto do gradiente geotérmico pela condutividade térmica de uma determinada rocha.

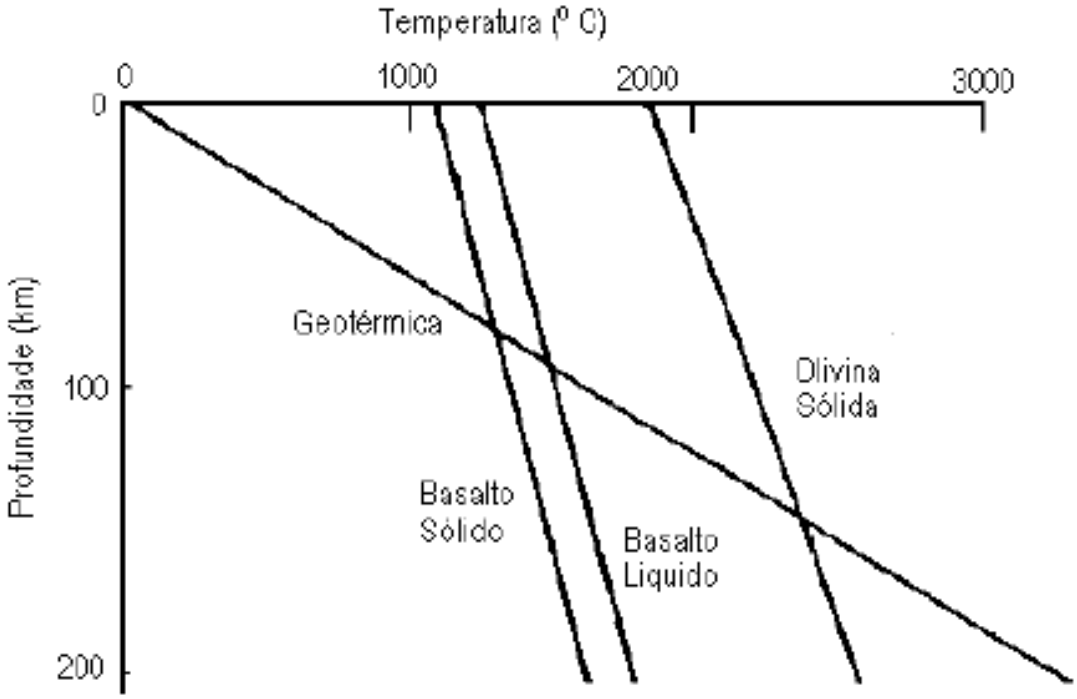


Figura 27: Exemplo de curva geotérmica em comparação com as curvas de fase do basalto e da olivina. A figura prevê que a 150 km de profundidade praticamente todo o manto esteja fundido, o que não corresponde às informações obtidas por sísmica. Sendo assim, o modelo de condução de calor não é adequado para identificar perfis de temperatura do manto.
Fonte: Miranda *et al.* (2000).

Estima-se que a Terra tenha atualmente uma perda global de calor pela superfície de aproximadamente $4{,}2 \times 10^{13}$ W, sendo 73% desse valor perdido através dos oceanos, principalmente devido à criação e ao resfriamento da crosta oceânica (MIRANDA *et al.*, 2000).

Para Pacca e McReath (2000) o fluxo geotérmico total corresponde a $1{,}4 \times 10^{21}$ joules por ano, sendo bastante mais significativo do que outras perdas de energia da Terra, como a perda desaceleração da rotação pela ação das marés (10^{20} joules por ano) ou a energia liberada por terremotos (10^{9} joules por ano). A energia para a movimentação horizontal da litosfera e a geração do campo geomagnético provém do calor interno da Terra.

Tabela 03: Perda de calor pela superfície da Terra.

Região	Área (10^6 km²)	Fluxo de Calor Médio (10^{-3} W/m³)	Perca de Calor (10^{12} W)
Continentes (incl vulcões)	149		8.8
Escudos Continentais	52		2.8
Total Continental	*201*	*57*	*11.6*
Oceano Profundo	282		27.4
Bacias Marginais	27		3.0
Contribuição Conductiva		66	20.3
Contribuição hidrotermal		33	10.1
Total Oceanico	*309*	*99*	*30.4*
Total Global	510	82	42.0

Fonte: Miranda *et al.* (2000).

No assoalho oceânico, o fluxo de calor em superfície diminui na medida em que a rocha se afasta da cordilheira meso-oceânica e, consequentemente, fica mais antiga. No continente, o fluxo de calor decresce na medida em que aumenta a idade tectônica da região, mas outros fatores como intrusão magmática e desintegração radioativa tornam mais complexa a relação.

Na crosta terrestre, os isótopos radioativos são uma importante fonte direta de calor. O granito é a rocha que mais produz calor devido à desintegração radioativa, sendo, portanto, esse processo mais significativo na crosta continental do que na oceânica.

Tabela 04: Calor liberado pelos principais isótopos radioativos.

Isotopo	Período	Proporção de isótopos	Calor Libertado Cal/g ano
^{238}U	4.5×10^9 ano	99.3 %	0.73
^{235}U	0.7×10^9 ano	0.7 %	
^{232}Th	13.9×10^9 ano	100 %	0.2
^{40}K	1.3×10^9 ano	0.01 %	27×10^{-6}

Fonte: Miranda *et al.* (2000).

Para o manto e o núcleo externo o processo dominante de transferência de calor é o convectivo, no qual o calor é transportado através da movimentação do material fluido. Pode-se considerar que os gradientes de temperatura do manto e do núcleo externo sejam praticamente adiabáticos. Dessa forma, uma rocha que ascenda rapidamente de uma profundidade (z) para outra (z – Δz) sofre diminuição de pressão e consequente aumento de volume. O fluido resfria devido à expansão, praticamente sem troca de calor com o ambiente. Nesse caso a variação de temperatura pode ser obtida por:

$$\partial T / \partial z = - T g \alpha c^{-1} \qquad (5.33)$$

Onde:

g = aceleração local da gravidade em m s^{-2};

α = coeficiente de dilatação térmica em °C^{-1};

c = calor específico do material em kg °C^{-1}.

Miranda *et al.* (2000) generalizam para o manto superior um gradiente adiabático de 0,5°C km^{-1} (com T = 1573 K, α = $3x10^{-5}$ °C e c = 10^3 j kg °C^{-1}).

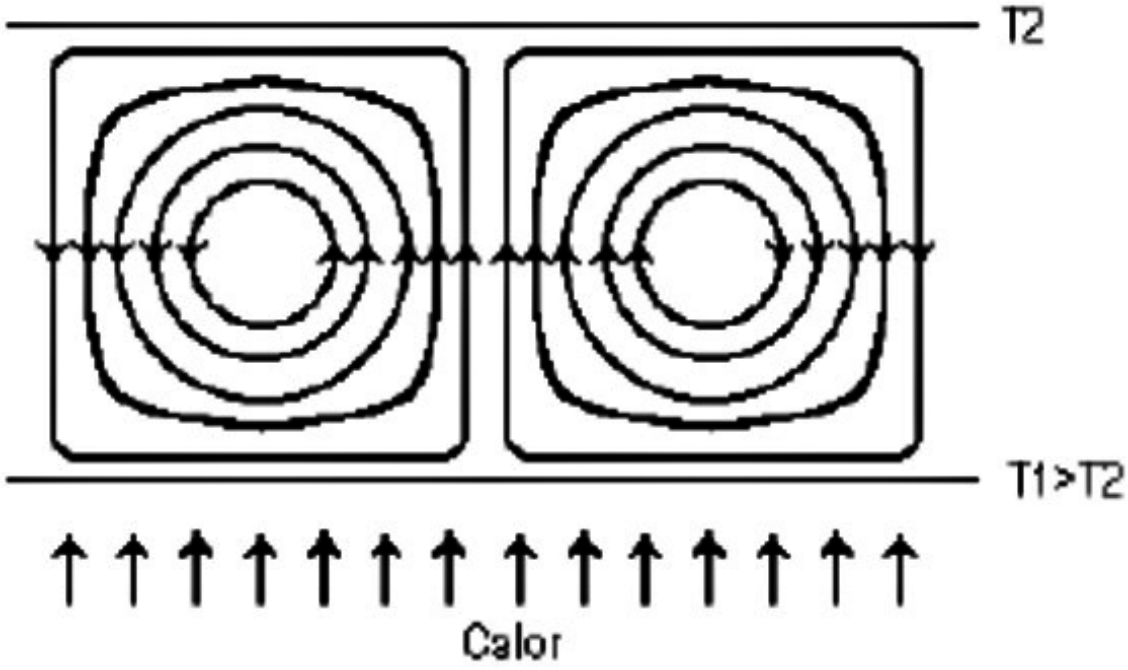


Figura 28: Fluxo convectivo de calor.
Fonte: Miranda *et al.* (2000).

5.3 Raios cósmicos

As nuvens influenciam a transferência radiativa vertical da atmosfera tanto provocando resfriamento quanto aquecimento, através da reflexão de radiação externa de ondas curtas ou através da reflexão e retenção de radiação interna de ondas longas. Uma nuvem em particular impacta na radiação atmosférica

dependendo de sua altura acima da superfície e de sua profundidade ótica. (SVENSMARK, 2000).

Sabe-se que uma gota de água pura não se formaria nas condições atmosféricas naturais, devido a necessidade de uma supersaturação em nível muito elevado. Dessa forma, a água necessita de uma superfície sobre a qual se condensar. No ar, partículas denominadas núcleos de condensação servem a este propósito (AMBAUM, 2010).

Os núcleos de condensação com raios entre 0,2μm e 1,0μm, como aqueles formados por sulfato de amônia, são os responsáveis pela maioria das gotas encontradas nas nuvens (OLIVEIRA; VIANELLO; FERREIRA, 2001).

Discussões atuais apontam para a ação dos raios cósmicos na formação de núcleos de condensação na atmosfera, embora de forma conjunta com outros processos. Dessa forma, os raios cósmicos teriam influência direta na formação de nuvens e, portanto, no clima planetário.

Durante os picos de atividade solar a intensa atividade magnética do Sol protege a Terra da incidência de raios cósmicos. A maior penetração de raios cósmicos na atmosfera terrestre ocorre, então, nos períodos de baixa atividade solar (RODRIGUES, 2000).

No equador e em suas proximidades a ação dos raios cósmicos é menos influente devido à maior eficiência do campo magnético terrestre em dificultar sua penetração nessa região (ONÇA, 2008).

Os raios cósmicos são partículas altamente energéticas, em sua maioria núcleos de átomos de H e de He, aceleradas em ambientes extremos do universo, como na explosão de uma supernova. Essas partículas viajam pelo espaço praticamente à velocidade da luz (LIP, 2007).

A energia dos raios cósmicos é medida em elétron-volt e varia normalmente entre 10^6 eV e 10^{20} eV. Parece haver uma relação linear inversamente proporcional entre a energia dos raios cósmicos e a frequência com a qual atingem a Terra (LIP, 2007).

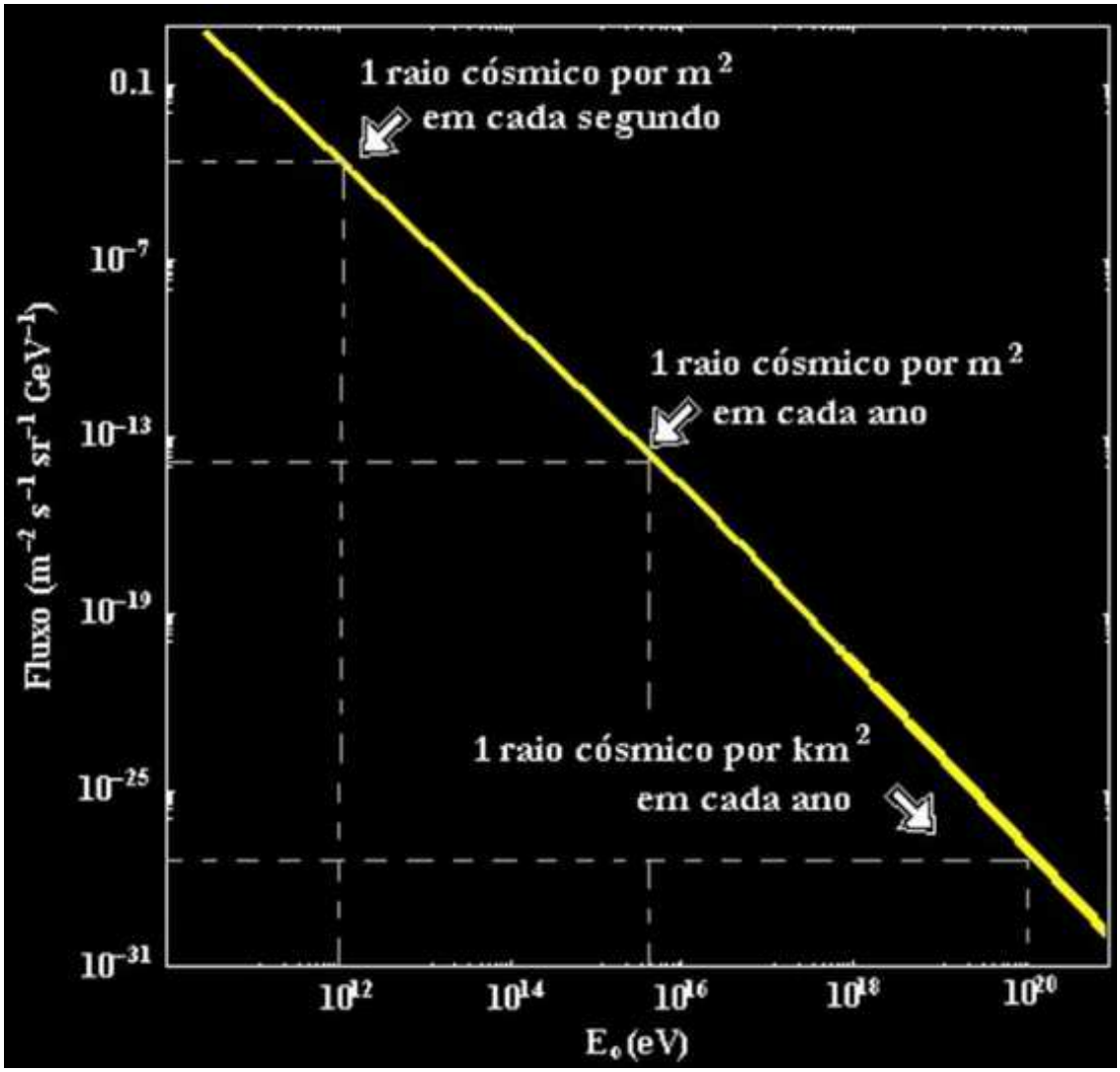


Figura 29: Fluxo de raios cósmicos que atingem a Terra em função de sua energia.
Fonte: LIP, (2007).

Quando essas partículas de alta energia penetram a atmosfera elas reagem com os núcleos dos gases atmosféricos, gerando partículas secundárias, as quais são lançadas ainda com alta energia, colidindo com outros núcleos, em um processo contínuo até que a energia original dos raios cósmicos seja dissipada. Esse processo é denominado cascata de partículas (LIP, 2007).

A série de choques e formação de novas partículas converte a energia (E) cinética dos raios cósmicos em massa (m) de acordo com a relação massa-energia de Einstein:

$$E = \gamma\, m\, c^2 \qquad (5.34)$$

Onde:

$\gamma = (1 - v^2 c^{-2})^{-1/2}$ fator relativista de Lorentz;

c = velocidade da luz no vácuo em m s^{-1}.

Nesse efeito de cascata na alta atmosfera núcleos de ^{14}N são bombardeados por nêutrons em alta velocidade. Um próton é expulso do núcleo, resultando em um átomo de carbono com oito nêutrons, o isótopo radioativo ^{14}C.

$$_{7}N^{14} + {}_{0}n^{1} \rightarrow {}_{6}C^{14} + {}_{1}p^{1} \qquad (5.35)$$

Como as plantas absorvem o ^{14}C contido no dióxido de carbono atmosférico, o estudo de anéis de troncos de árvores contribui para estimar os níveis de atividade solar em períodos pretéritos (RODRIGUES, 2000).

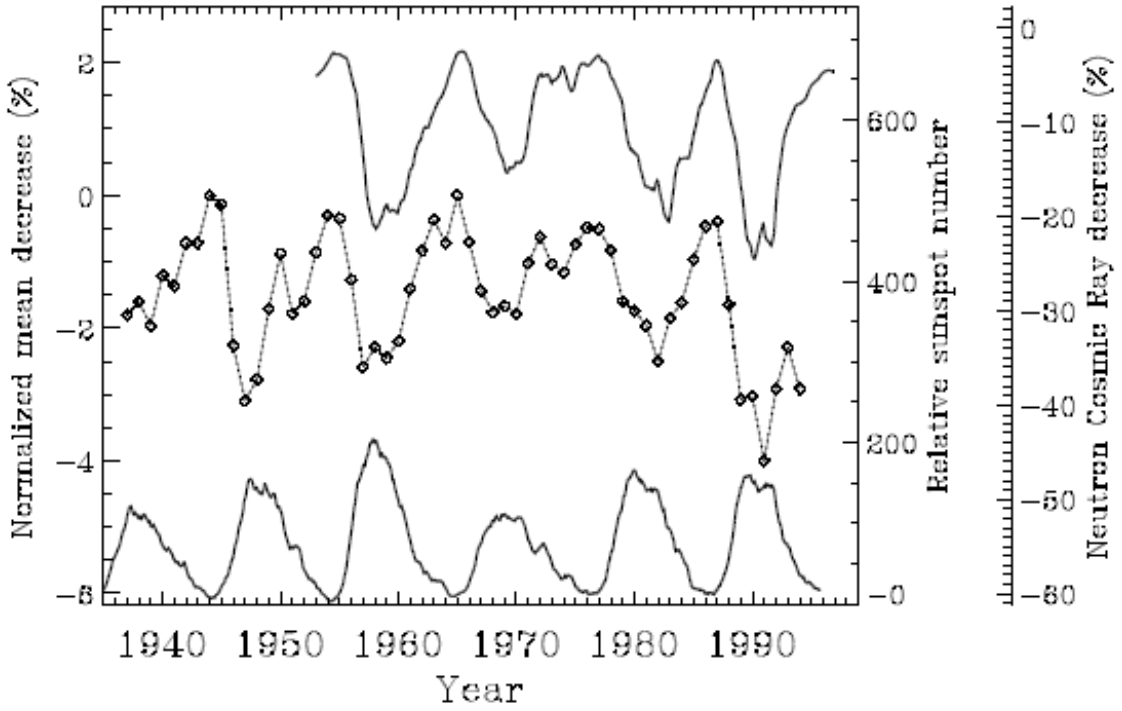


Figura 30: A curva superior mostra o fluxo de raios cósmicos a partir do monitor de nêutrons CLIMAX, no Colorado, Estados Unidos, (1953 a 1996). A curva do meio é a variação anual de raios cósmicos mensurada em câmaras de ionização (1937 a 1994). A curva inferior é relativa ao número de manchas solares.
Fonte: Svensmark (2000).

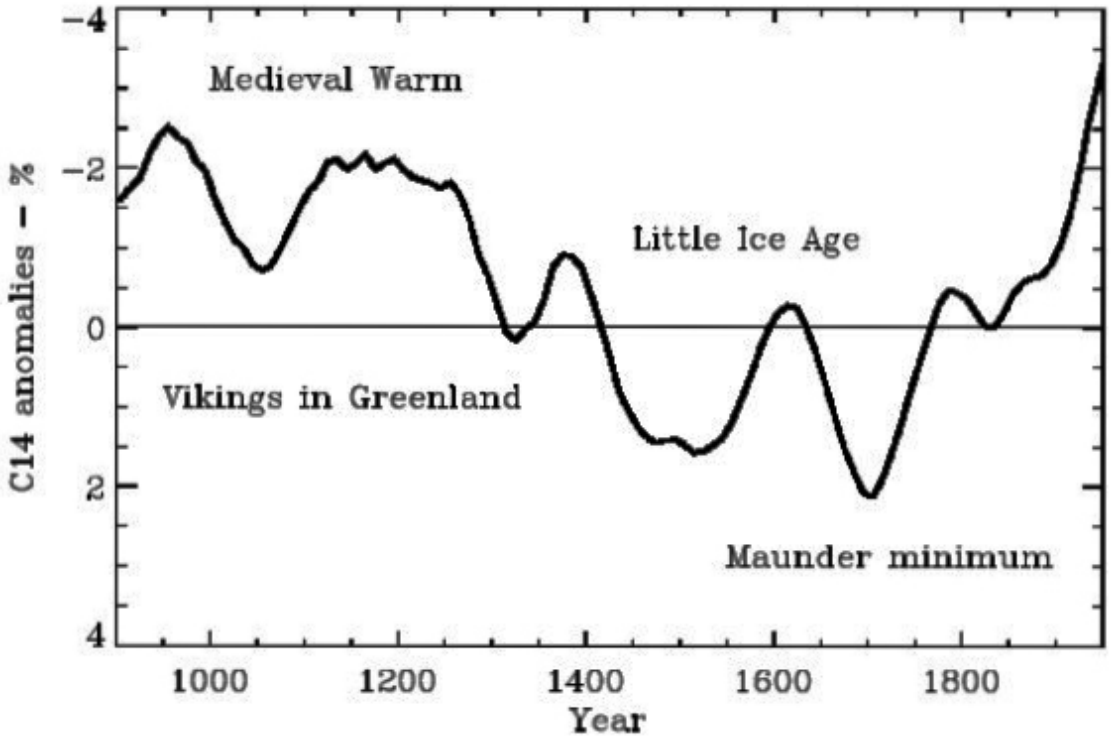


Figura 31: Variação na concentração de C^{14} nos últimos 1000 anos. No período do mínimo de Maunder, a baixa atividade solar possibilitou maior entrada de raios cósmicos na atmosfera terrestre, de forma que a concentração de C^{14} foi elevada.
Fonte: Svensmark (2000).

Além disso, a incidência dos raios cósmicos também provoca a ionização de gases atmosféricos, a excitação de moléculas, a emissão de radiação eletromagnética e a formação de neutrinos. Dentre as partículas secundárias geradas na cascata de partículas estão os elétrons, os múons, os hádrons e, principalmente, os fótons (LIP, 2007). Os múons são os principais responsáveis pela ionização na porção inferior da troposfera (SVENSMARK, 2000).

Estima-se que 98% das partículas altamente energéticas que penetram a atmosfera terrestre e atingem a superfície são múons, os quais tem massa 200 vezes superior à do elétron. O restante é basicamente composto por prótons e nêutrons que não reagiram com os gases atmosféricos. Dentre os múons que chegam a 2000m de altitude, cerca de 60% são tão energéticos que praticamente não sofreram resistência do campo magnético solar. Os 40% restantes que chegam a altitudes tão baixas variam de acordo com a atividade magnética solar, por serem partículas menos energéticas. O campo magnético terrestre costuma ser efetivo apenas com relação aos 3% de partículas menos energéticas que atingem baixas altitudes. (SVENSMARK; CALDER, 2007, *apud* ONÇA, 2008).

Kirkby *et al.* (2011), em importante estudo realizado no experimento CLOUD no CERN, concluíram que a amônia na atmosfera aumenta mais de 100 vezes a nucleação de partículas de ácido sulfúrico, que é um dos principais núcleos de condensação atmosférico. O processo se dá a partir da acreção gradativa de moléculas de amônia. Os íons aumentam de duas a dez vezes sua taxa de nucleação do ácido sulfúrico quando submetidos a raios cósmicos com

intensidade suficiente para atingir a superfície terrestre. Contudo, concluíram que mesmo assim as concentrações atmosféricas de ácido sulfúrico e amônia são insuficientes para explicar toda a formação observada de gotas, de forma que outros compostos ainda não identificados devem estar envolvidos no processo de formação de nuvens.

O experimento SKY, do Centro Nacional Espacial Dinamarquês, também chegou à conclusão de que as partículas aceleradas aumentam a taxa de formação de núcleos de ácido sulfúrico, os quais servem de núcleos de condensação na atmosfera. Svensmark (2000; 2007) já apontava para a importância desses experimentos, pois demonstram que os raios cósmicos efetivamente influenciam o clima. De outra forma poderia se argumentar que a atividade solar influi diretamente sobre o clima e o fluxo de raios cósmicos sofre alterações paralelas sem relação direta com o sistema climático da Terra, como dito por Shaviv (2005).

A partir de sua influência sobre a cobertura de nuvens, há uma correlação inversa entre o fluxo de raios cósmicos e a temperatura na Terra, de forma que um aumento do fluxo de raios cósmicos está associado a uma queda da temperatura média, devido ao aumento da nebulosidade (SVENSMARK, 2000).

Assim, quando a atividade solar é menos intensa, havendo, portanto, pequeno número de manchas solares, a grande incidência de raios cósmicos ocasiona maior cobertura de nuvens e, consequentemente, um efeito de resfriamento.

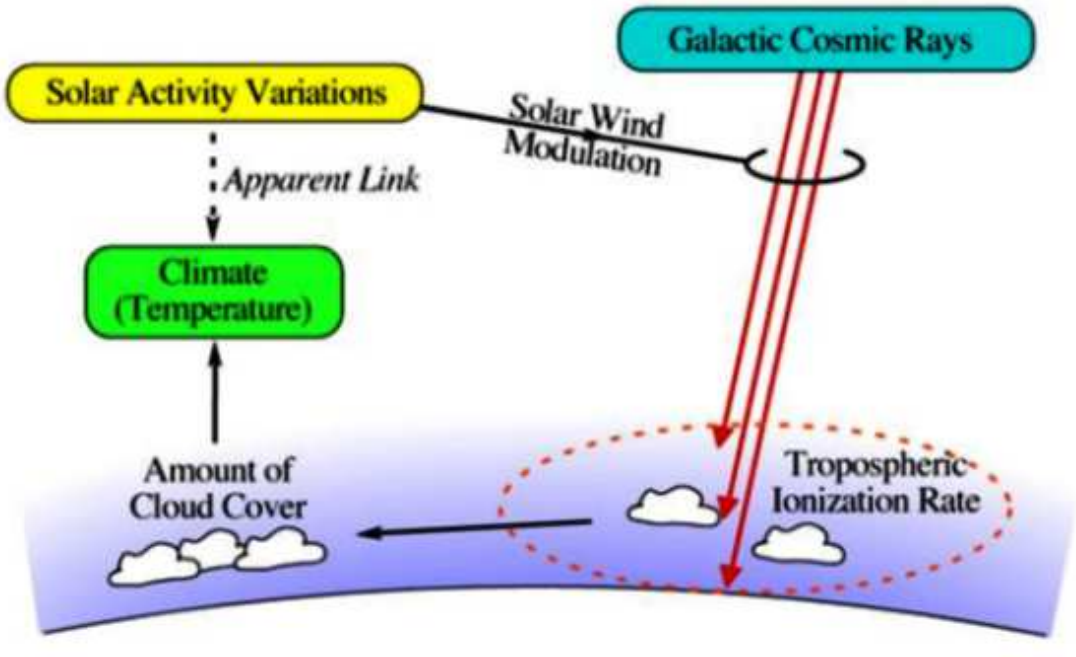


Figura 32: Influência indireta do Sol no sistema climático terrestre através da variação do fluxo de raios cósmicos que atingem a Terra.
Fonte Shaviv (2005).

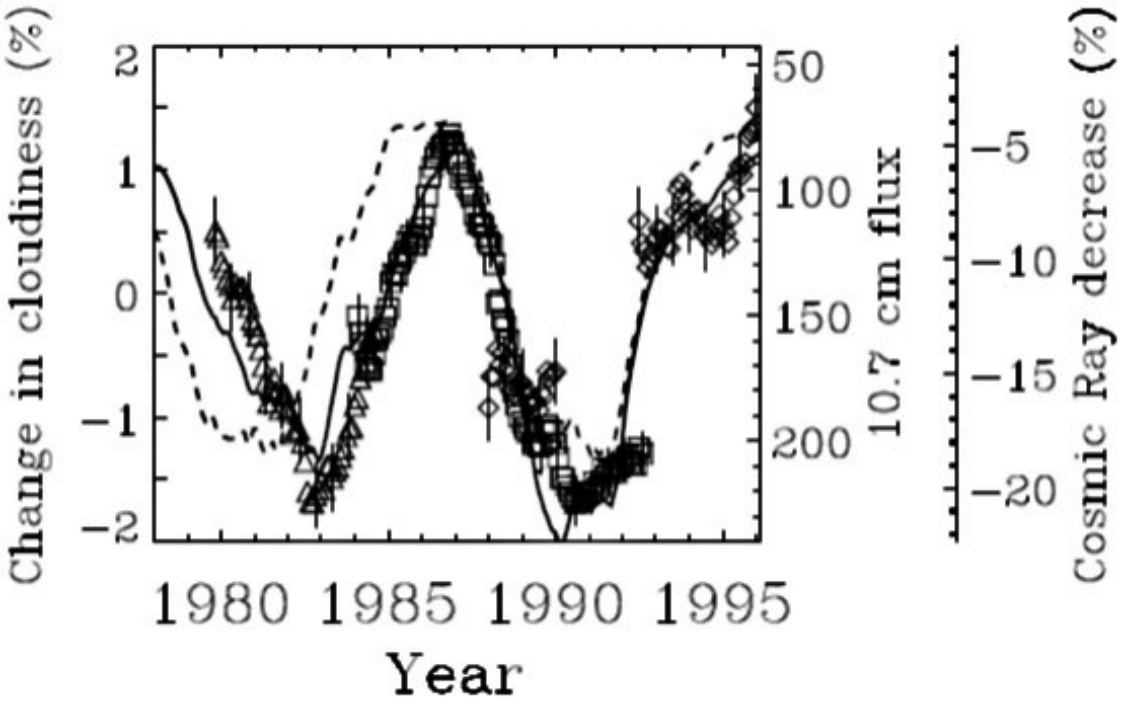


Figura 33: Relação entre nebulosidade e fluxo de raios cósmicos de 1980 a 1995. A linha sólida representa o fluxo de raios cósmicos mesurados no CLIMAX, a linha tracejada representa o fluxo solar de 10,7cm (em 10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}). Os outros dados são referentes à cobertura de nuvens mensurada a partir de satélites, sendo os triângulos do Nimbus7, os quadrados do ISCCP_C2 e do ISCCP_D2 (International Satellite Cloud Climatology Project) e os losangos do DMSP.
Fonte: Svensmark (2000).

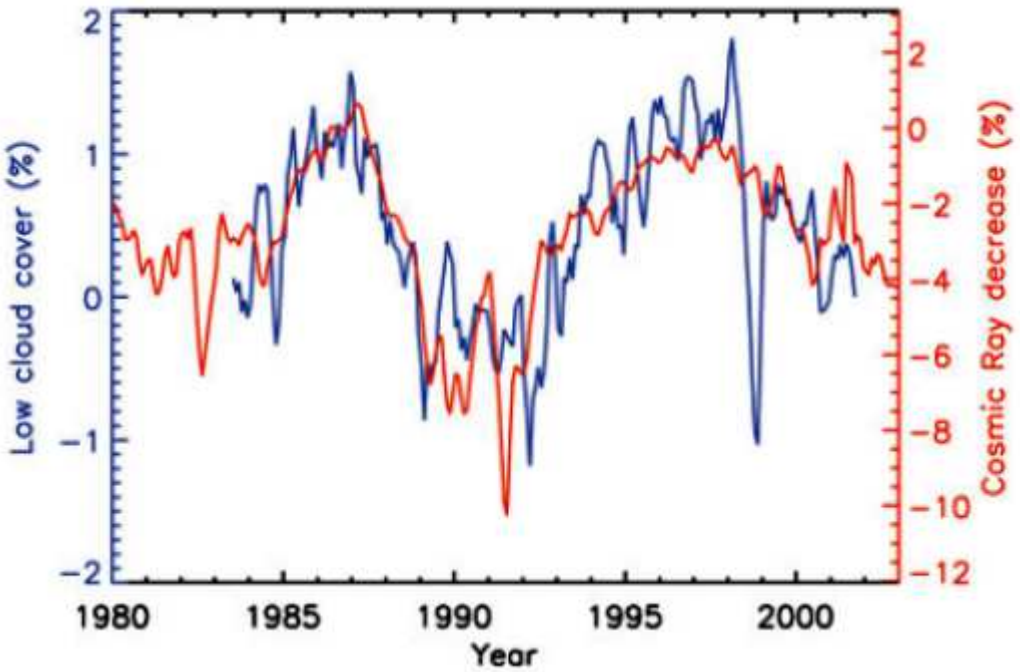


Figura 34: Relação entre nebulosidade e fluxo de raios cósmicos de 1983 a 2002. Fluxo de raios cósmicos (em laranja) medidos no monitor de nêutrons do CLIMAX e a cobertura de nuvens de baixa altitude medidas a partir de dados de satélite do ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project).
Fonte: Shaviv (2005) adaptado de Marsh e Svensmark (2003).

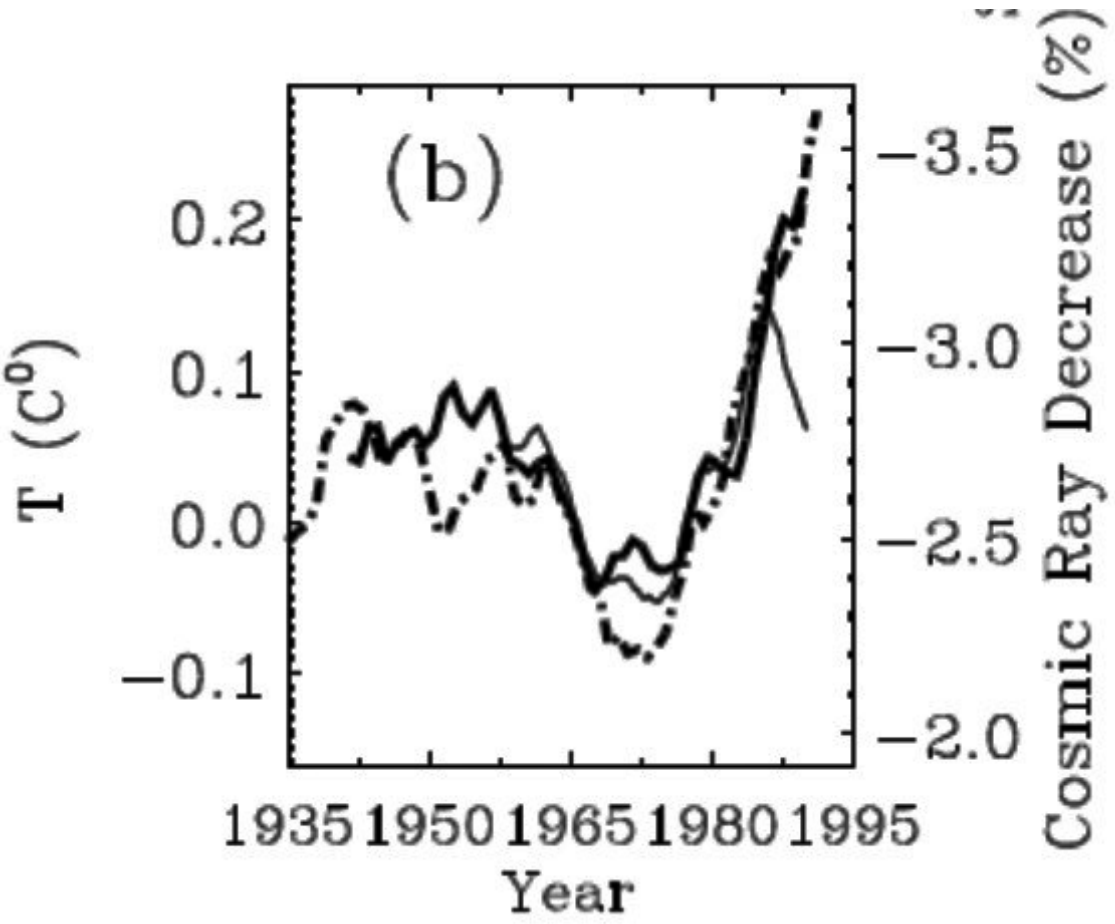


Figura 35: Correlação entre anomalia de temperatura e o decréscimo do fluxo de raios cósmicos, sendo a linha tracejada a temperatura média do ar no hemisfério norte, a linha grossa contínua o fluxo de raios cósmicos de alta energia mensurados em câmaras de ionização e a linha fina contínua – sem escala – o fluxo de raios cósmicos menos energéticos mensurados no monitor de nêutrons CLIMAX.
Fonte: Svensmark (2000).

Rossow e Cairns (1995) *apud* Svensmark (2000) estimaram a partir de dados de satélite e modelagem numérica que a variação de 1% da cobertura de nuvens da Terra corresponde a uma variação de 0,5 W m^{-2} no balanço de radiação. Svensmark *et al.* (1997) *apud* Svensmark (2000) mostram que entre 1987 e 1990 houve uma variação de nebulosidade de aproximadamente 3,0%, mensurada por satélites. No mesmo período as câmaras de ionização mostraram uma mudança de 3,5% a mais no fluxo de raios cósmicos de alta energia, resultando em uma variação aproximada de 1,5 W m^{-2} no balanço de radiação. Como no período entre 1975 e 1989 houve uma variação de 0,9% no fluxo de raios cósmicos, pode-se estimar a variação para o período na forçante climática relativa à cobertura de nuvens em decorrência do fluxo de raios cósmicos:

$$\Delta n / \Delta f = 3{,}0\% / 3{,}5\% = 0{,}86\% \quad (5.36)$$

$$\Delta n' = 0{,}86\% * 0{,}9\% = 0{,}77\% \quad (5.37)$$

$$\Delta w = 0{,}77\% * 0{,}5 \text{ W m}^{-2} = 0{,}39 \text{ W m}^{-2} \quad (5.38)$$

Sendo:

Δn / Δf = variação da nebulosidade em função da variação do fluxo de raios cósmicos entre 1987 e 1990;

$\Delta n'$ = variação da nebulosidade entre 1975 e 1989;

Δw = variação no balanço de radiação por parte da forçante climática relativa à nebulosidade.

Embora seja apenas uma estimativa em um período recente e restrito, e não haja ainda um volume maior de dados de satélite para comparação, a influência dos raios cósmicos sobre o clima terrestre se mostra significativa.

Neff *et al.* (2001), ao investigarem as estalagmites em uma caverna em Omã encontraram uma excelente correlação entre as variações de ^{14}C medidos a partir de anéis de árvores e o $\delta^{18}O$ presente na calcita das estalagmites. A precipitação da calcita e consequente formação das estalagmites estão ligadas a um período do Holoceno Médio no qual a caverna era bem mais úmida, devido a uma variação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a qual levava as chuvas de monções mais ao norte, até o local que hoje apresenta um clima árido a semiárido. Os valores de $\delta^{18}O$ são por sua vez inversamente relacionados à intensidade das chuvas sob influência da ZCIT, sendo os picos relacionados à diminuição das mesmas.

Como a formação de ^{14}C é diretamente influenciada pela atividade solar, a forte correlação com o $\delta^{18}O$ mostra que este também está sob influência dessa forçante, embora não esteja diretamente ligado às variações de temperatura. Mesmo que ainda não seja possível apontar para o mecanismo pelo qual a variação da atividade solar influi nas monções do oceano Índico, é provável que ocasione mudanças nas circulações atmosférica e oceânica. O estudo sugere que uma menor formação da Água Profunda do Atlântico Norte – a qual controla a incorporação de ^{14}C ao oceano – poderia levar a invernos rigorosos na Europa e na Ásia, aumentando a cobertura de neve no platô tibetano e, consequentemente, enfraquecendo as monções no verão.

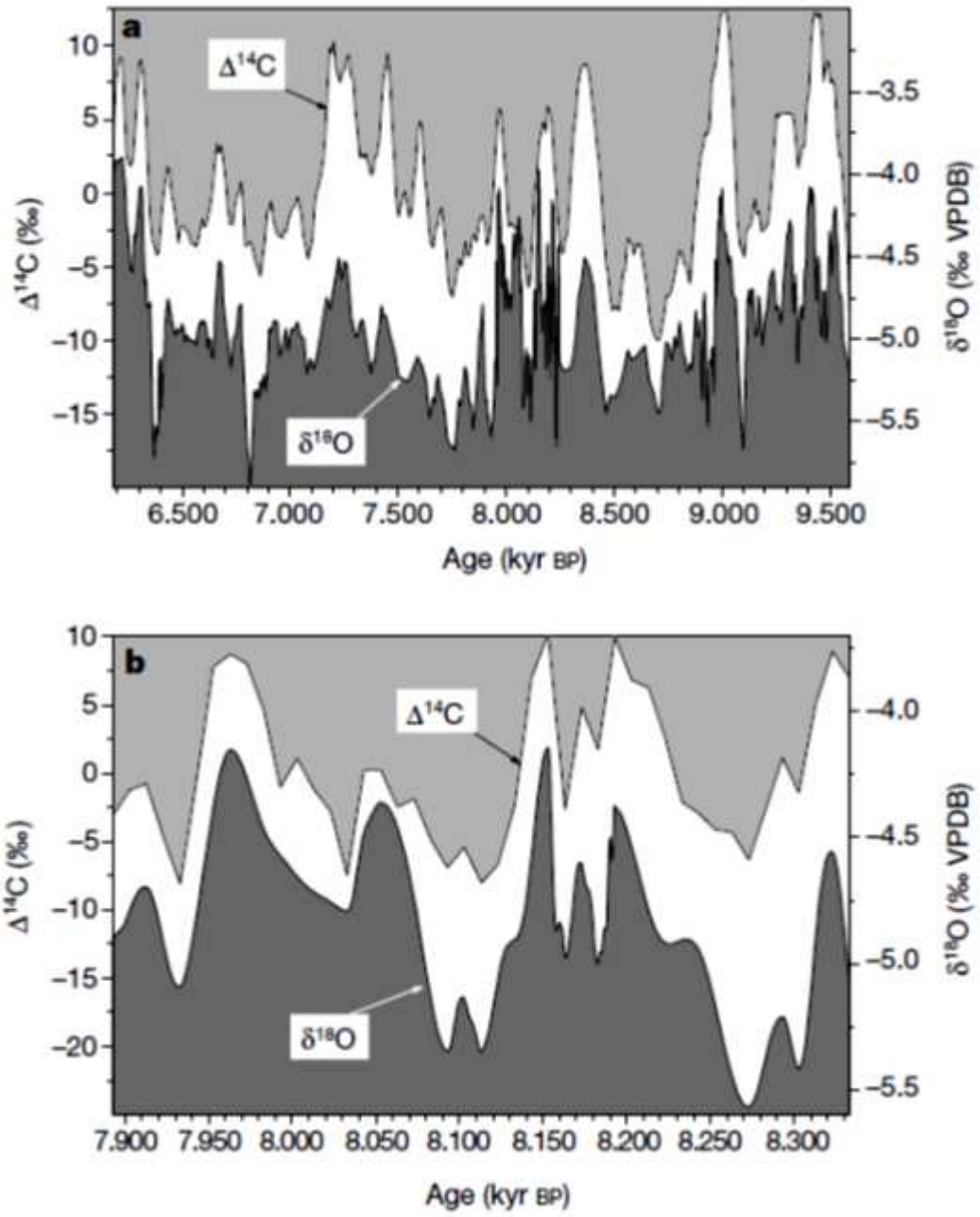


Figura 36: Correlação entre δ18O de estalagmites em uma caverna no Omã e ^{14}C atmosférico medido a partir de anéis de árvore. A figura a mostra todo o intervalo de amostragem e a figura b mostra um intervalo de alta resolução.
Fonte (NEFF et al., 2001).

A partir dos estudos de Beer *et al.* (1985, 1991 *apud* Svensmark, 2000) e de Jones *et al.* (1998, *apud* Svensmark, 2000), percebe-se que, durante o período do Mínimo de Maunder, período com registro de poucas manchas solares o qual conteve a década mais fria do último milênio, entre 1690 e 1700, houve uma pequena variação na irradiância solar, não sendo esta significativa o suficiente para explicar por si só o resfriamento. Contudo, correlações da concentração de ^{10}Be – a qual está relacionada à atividade magnética solar – com as temperaturas do hemisfério norte indicam uma influência importante dos raios cósmicos no clima terrestre.

Ou seja, nos períodos com altas concentrações de ^{14}C e ^{10}Be é possível perceber um resfriamento, o qual pode estar associado ao aumento da nebulosidade devido à ação dos raios cósmicos.

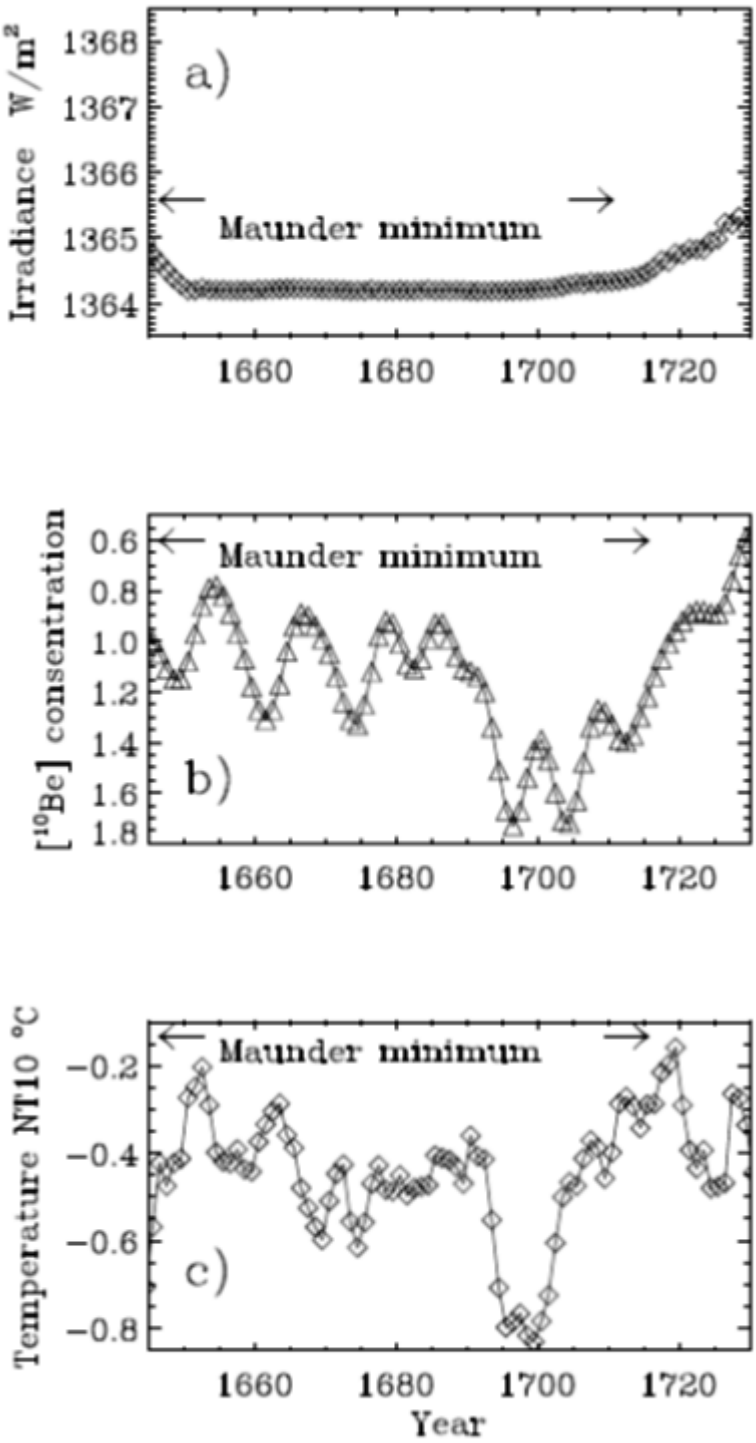


Figura 37: Comparação entre irradiância solar, concentração de ^{10}Be e temperaturas do hemisfério norte durante o Mínimo de Maunder.
Fonte: Svensmark (2000).

A origem dos raios cósmicos ainda é um mistério científico. Sabe-se que partículas menos energéticas podem ser aceleradas pelo campo magnético do

Sol. Embora este seja uma fonte de raios cósmicos, o mesmo não parece ser responsável pela quantidade de partículas de alta energia que atingem a Terra e tampouco pelas partículas mais energéticas já registradas (RODRIGUES, 2000). Especula-se que nuvens magnéticas de alta intensidade em movimento, explosões de supernovas e estrelas de nêutrons – cujos campos magnéticos chegam a ser bilhões de vezes maiores do que o do Sol – seriam responsáveis por acelerar essas partículas na Via Láctea.

Enquanto a teoria do dinamarquês Svensmark mostra uma influência climática dos raios cósmicos em escalas temporais de décadas e de séculos, O israelense Nir J. Shaviv aponta para uma influência ao longo do tempo geológico e independente da modulação pela atividade solar.

Para Shaviv (2002; 2003; 2005), uma vez que a maioria das estrelas nas galáxias-espiral é formada nos braços da espiral, nesses locais também está a maior parte das supernovas. O sistema solar movimenta-se dentro da Via-Láctea, cruzando periodicamente a espiral, de forma a receber uma maior quantidade de partículas aceleradas nas explosões estelares. Essas partículas mais energéticas sequer sofrem influência significativa do campo magnético solar. Shaviv (2005) estima ainda que a variação do fluxo de raios cósmicos procedentes dos braços da espiral galáctica é de ordem 10 vezes superior àquela procedente da modulação pela atividade solar.

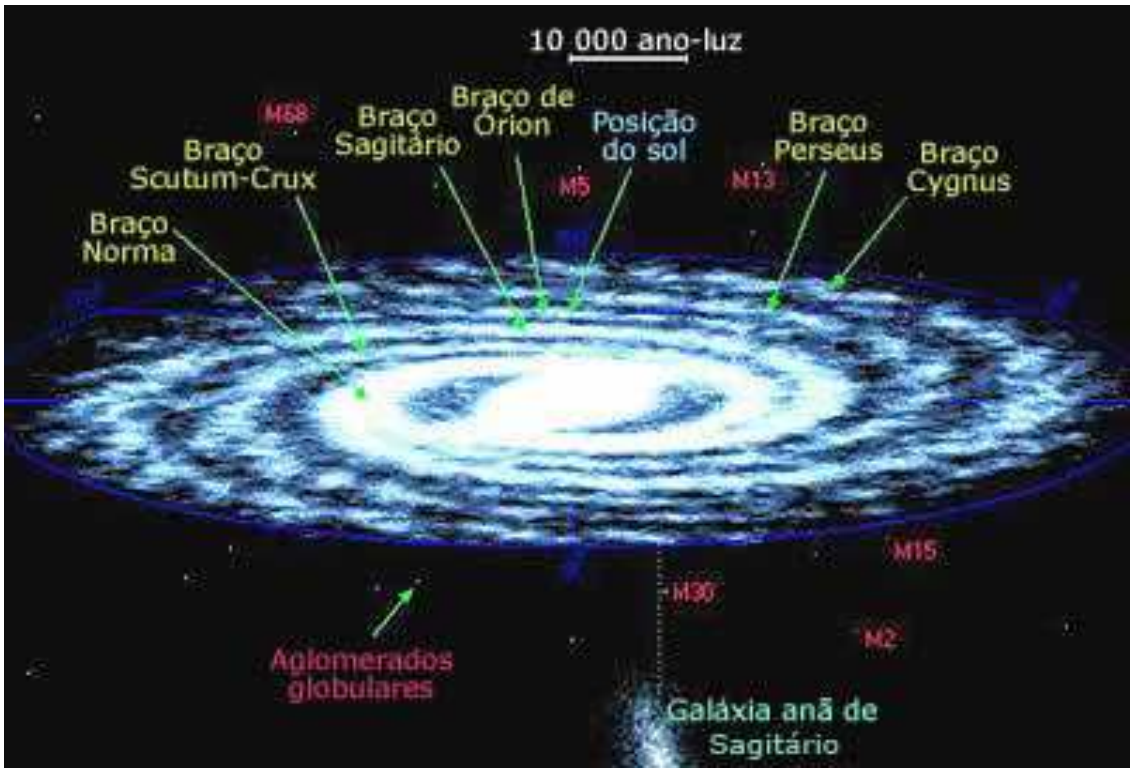


Figura 38: Braços em espiral da Via-Láctea.
Fonte: Geeknisses (2013).

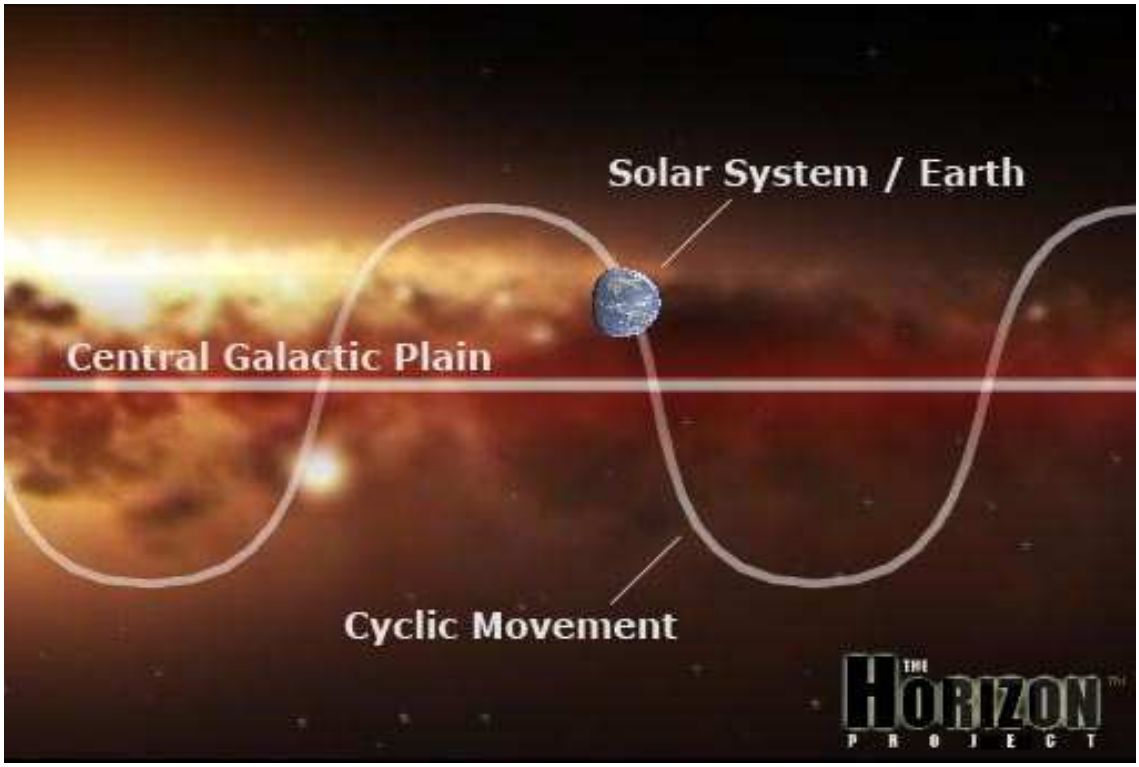


Figura 39: Movimento do Sistema Solar cruzando o plano central da Via-Láctea.
Fonte: Geeknisses (2013).

Para Shaviv (2002) o aquecimento global percebido nos últimos 120 anos seria menos da metade atribuído a gases estufa antropogênicos e mais da metade devido ao fluxo de raios cósmicos capazes de atingir a troposfera. No modelo de difusão de raios cósmicos elaborado por Shaviv – o qual inclui os movimentos dos braços da Via Láctea e do Sistema Solar e a formação de supernovas na galáxia – o fluxo de raios cósmicos poderia variar a temperatura média da Terra entre 10 K e -5 K, relativo à atual temperatura. O cientista israelense afirma que a cada vez que o Sol cruza um dos braços da galáxia, a variação do fluxo de raios cósmicos é suficiente para engatilhar uma era glacial.

Shaviv (2002, 2003, 2005) demonstra através da datação de meteoritos de ferro, em função da razão ^{40}K /^{41}K, que a variação do fluxo de raios cósmicos possui forte correlação com a passagem do Sistema Solar pelos braços da espiral galáctica e com as eras glaciais do último Eon, conforme os estudos de Crowell (1999) *apud* Shaviv (2002) e Frakes *et al.* (1992) *apud* Shaviv (2002) sobre as glaciações na Terra.

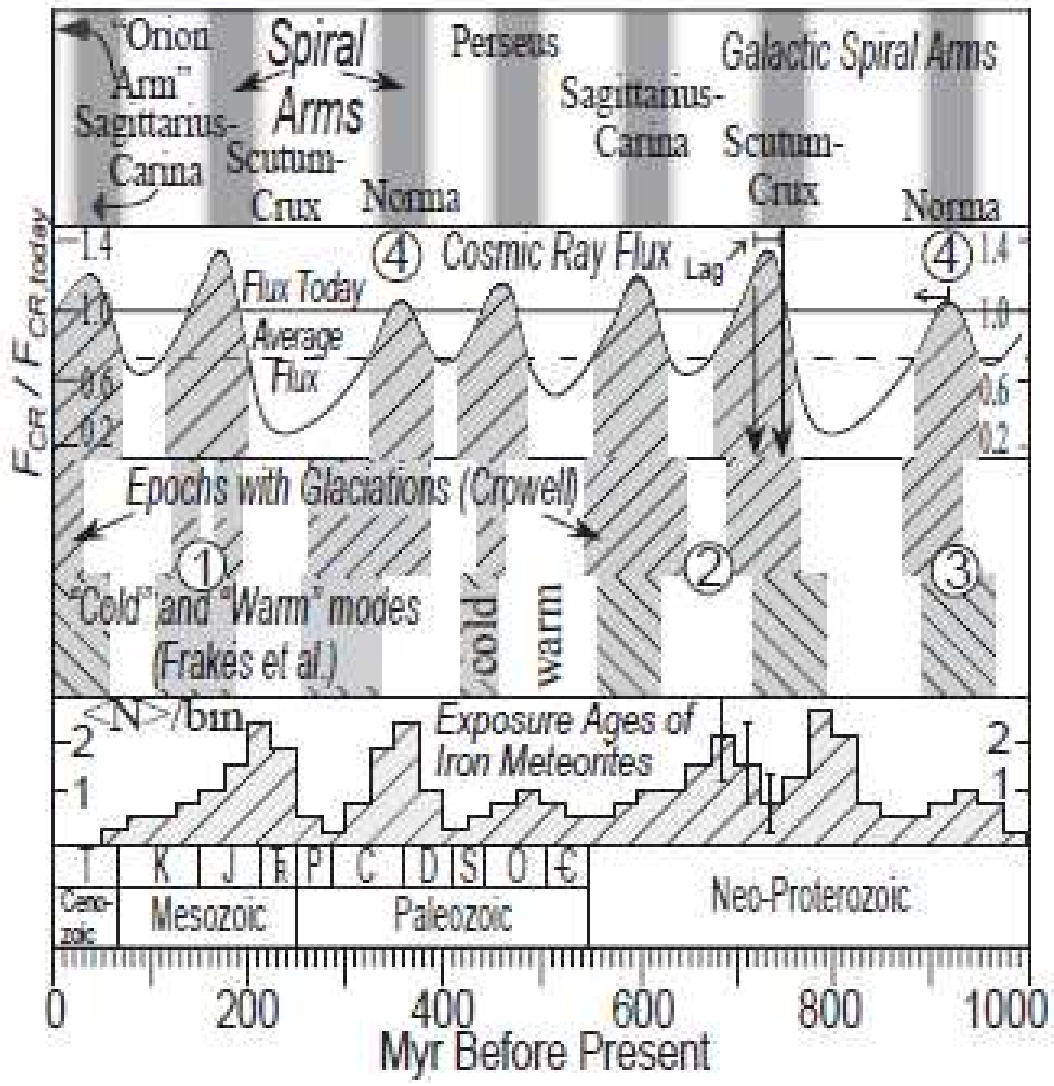


Figura 40: Fluxo de raios cósmicos no último Eon. O painel A mostra o cruzamento dos braços-espirais da galáxia pelo Sol. O painel B mostra o fluxo de raios solares que atingem o Sistema Solar, de acordo com o modelo de difusão de raios cósmicos. O painel C mostra os períodos glaciais segundo J. C. Crowell (1999) *apud* Shaviv 2002 – o qual afirma não haver dados suficientes para apontar uma periodicidade das glaciações – e L. A. Frakes *et al.* (1992) *apud* Shaviv (2002) – o qual afirma existir periodicidade. O painel D mostra um histograma das idades de exposição dos meteoritos aos raios cósmicos, cujos picos coincidem com os mínimos do fluxo de raios cósmicos.
Fonte: Shaviv (2002).

Sabe-se atualmente que os raios cósmicos de maior energia são prótons cuja propagação é bem conhecida. Entretanto, as direções de chegada desses raios indica que os mesmos não foram originados dentro da Via Láctea. Esse resultado, contudo, é paradoxal, uma vez que à grandes distâncias, partículas tão energéticas reagiriam com a radiação de fundo primordial remanescente do *Big-Bang*, dissipando sua energia. Por outro lado, não há evidências de objetos tão energéticos na galáxia que pudessem acelerar tais partículas em tal magnitude. Teoriza-se que a Teoria das Cordas poderia explicar a origem dessas partículas (TURTELLI, 2013). Contudo, não é pretensão desse trabalho discutir a origem dos raios cósmicos, não cabendo aqui uma discussão maior acerca dessas teorias.

5.4 Marés

As forças gravitacionais atuantes sobre o planeta geram distorções na matéria do sistema conhecidas como efeito de maré. Sabe-se que alguns corpos rochosos no Sistema Solar possuem grande geração de calor interno devido às compressões e dilatações do material em seu interior. Io, umas das maiores luas de Júpiter, por estar tão próxima ao enorme planeta gasoso, sofre um efeito de maré tão violento que gera calor suficiente para derreter o material de seu interior e originar atividades tectônicas e vulcânicas bastante ativas. Já no planeta Mercúrio as forças de maré são responsáveis em parte pela irregularidade de seu período rotacional. Especula-se também que a poderosa maré solar cause na superfície de Mercúrio feições escarpadas de grande extensão (MIRANDA *et al.*, 2000).

Os constantes alongamentos e compressões do material rochoso terrestre, principalmente em sua parte fluida, são uma das fontes de calor interno da Terra, embora a energia de maré não seja uma fonte significativa de energia interna comparada com o decaimento radioativo.

Na atmosfera terrestre as forças de maré solar e lunar são suficientes para causar perturbações no campo magnético terrestre (MIRANDA *et al.*, 2000). Contudo, na Terra, o efeito de maré só é percebido como significativo em sua matéria fluida, principalmente nos grandes corpos aquosos. Por isso, o termo maré é normalmente associado à maré oceânica.

As marés oceânicas são as maiores ondas oceânicas e são caracterizadas por subidas e descidas com períodos de aproximadamente 12h e 24h. As pessoas tendem a pensar que as marés “vem” e “vão” sobre a costa, mas na verdade elas são a elevação e o recuo do nível do mar (BERGAN, 1999).

Segundo DAVIS e FITZGERALD (2004):

> *”Os corpos celestes produtores de maré na Terra são a Lua, devido a sua proximidade, e o Sol, devido a sua massa colossal. Os outros planetas no sistema solar não têm essencialmente nenhum efeito nas marés devido às suas massas relativamente pequenas se comparadas à do Sol, e suas distâncias da Terra, se comparados com a Lua. Embora as forças de atração da Lua e do Sol produzam pequenas marés na porção sólida da Terra e grandes oscilações na atmosfera, é na facilmente deformável porção líquida da Terra (hidrosfera) onde as marés são mais claramente visíveis.”*

A compreensão desse fenômeno passa pelo entendimento da Força de Gravidade. Newton demonstrou que, para um sistema inercial, a Força de Gravidade entre dois corpos é:

$$Fg^* = - (G\ M\ m / r^2)\ (r^*/r) \qquad (5.39)$$

Onde: Fg^* = vetor Força de Gravidade;

G = Constante Gravitacional;

M = Massa da Terra;

m = Massa do Corpo;

r = Distância do entre o corpo e a Terra;

(r*/r) = vetor unitário indicando a direção Terra-corpo de Fg*

A Terra e a Lua orbitam uma a outra, formando um sistema que gira em torno de um centro de massa comum chamado baricentro. Uma vez que a Terra tem massa 81,5 vezes maior do que a Lua, o baricentro está 81,5 vezes mais próximo da Terra, sobre a linha que une o centro dos dois astros. Essa distância é 4724km a partir do centro da Terra. Sendo o raio da Terra 6380km, o Baricentro está então localizado abaixo da superfície terrestre (BERGAN, 1999).

A rotação do sistema em torno do baricentro gera uma força centrífuga orientada para fora do centro. Ambos os astros giram em órbita elíptica (aproximada para circular para simplificação dos modelos) em torno do centro de massa do sistema a aproximadamente cada 27,3 dias. A força centrífuga total no sistema Terra-Lua é equivalente à atração gravitacional entre ambas, de forma que o sistema esteja em equilíbrio. Os vetores de força centrífuga em cada ponto da superfície terrestre possuem módulos iguais e são paralelos à linha que une o centro dos dois astros e sempre apontam no sentido oposto à força de atração gravitacional (BERGAN, 1999).

No entanto, sabe-se que para um corpo dentro do sistema, movimentando-se com o mesmo, o sistema não é inercial. Sabemos também que a Terra tem dimensões consideráveis e que, portanto, como Fg* tem grande variação de acordo com a distância, logo o raio da Terra passa a ter influência em Fg*, de modo que este se apresente diferente para corpos em diferentes pontos na superfície terrestre.

Contudo, considerando no sistema Terra-Lua um ponto P1 sobre a linha do equador terrestre, no lado virado para a Lua, a força de gravidade entre a Terra e a Lua será maior do que a força centrífuga, ao passo em que em um ponto P2 sobre a linha do equador do lado oposto ao do corpo, a força de gravidade entre a Terra e o corpo será inferior à força centrífuga.

Considerando a Terra com uma superfície líquida e contínua, uma partícula de água colocada nos dois pontos citados seria, ora mobilizada no sentido da Lua, ora movimentada para fora da Terra no sentido oposto à Lua.

Com a partícula entre o centro da Terra e a Lua, a soma vetorial da força centrífuga e da força de atração gravitacional Terra-Lua origina a chamada Força Geradora de Maré (Fm).

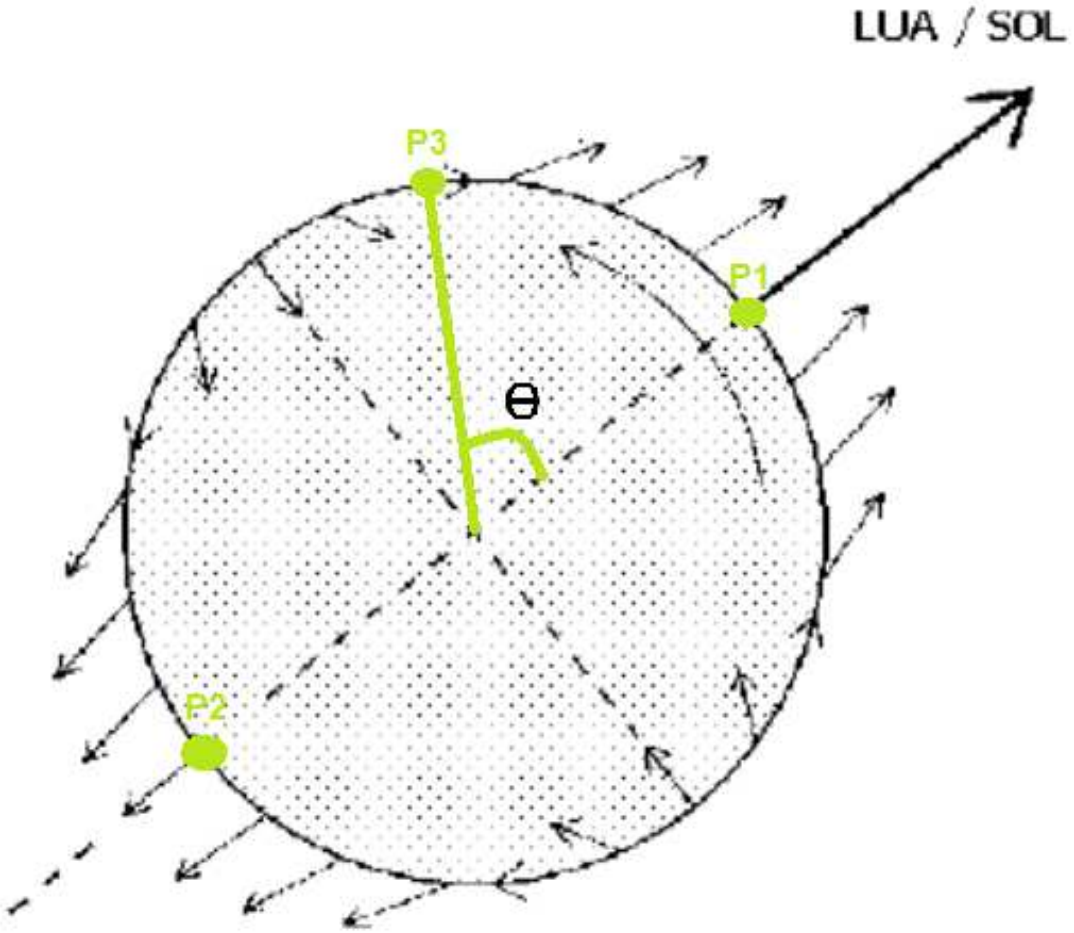


Figura 41: Forças de maré na Terra.
Fonte: Adaptado de Miranda *et al.* (2000).

No ponto P1, com a distância Terra-Lua igual a ($r-R_e$), sendo R_e o raio terrestre, temos:

$$Fm = (2\ R_e\ G\ M\ m\ /\ r^3) \qquad (5.40)$$

Em um ponto P2 oposto a P1 sobre a linha do equador a distância Terra-Lua passa a ser ($r + R_e$), então:

$$Fm = (-2\ R_e\ G\ M\ m\ /\ r^3) \qquad (5.41)$$

Pode-se ver que Fm é negativa do lado oposto à Lua, indicando que a força move a partícula no sentido oposto ao da Lua, da mesma forma que o sinal positivo indica a partícula sendo movida no sentido a favor da Lua, quando a partícula está entre a Lua e o centro da Terra. No centro da Terra Fm é nula.

A Força Geradora de Maré sobre uma partícula de água na superfície da Terra é inversamente proporcional ao cubo da distância entre a Lua e o centro da Terra. Desta forma, a superfície líquida e contínua é puxada na direção da Lua de um lado e empurrada para o sentido oposto do outro lado, gerando duas elevações de Maré.

Para um Ponto P3, localizado em um ponto qualquer da Terra, a distância Terra-Lua é obtida por R cos θ, onde θ é o ângulo formado entre P3, o Centro da Terra e a linha que liga o centro da Terra ao centro da Lua.

$$Fm = ((G\ M\ m\ /\ (r \pm R_e \cos \theta)^2) - (G\ M\ m\ /\ r^2)) \qquad (5.42)$$

Dessa forma, ao se aproximar dos polos, Fm passa a ter orientação para o centro da Terra, uma vez que a componente vertical de Fg não recebe oposição. Isso faz com que duas depressões de maré sejam criadas nos polos geométricos da Terra. Esses polos são em relação ao eixo Terra-Lua, não sendo os polos verdadeiros da Terra, em função de sua declinação.

O Sol, os outros planetas, mesmo as galáxias também tem efeito de Maré sobre a Terra, deformando a atmosfera, a hidrosfera e a litosfera. O Sol, embora tenha uma massa descomunal tem menor influência gravitacional sobre a superfície da Terra devido a esta ser inversamente proporcional ao cubo da distância. Por esse mesmo motivo todos os outros astros apresentam influência gravitacional pouco significativa sobre partículas na superfície terrestre.

5.5. Balanço de radiação e efeito estufa

Liou (2002) afirma que o fundamento do funcionamento do sistema atmosférico se dá com o equilíbrio radiativo no topo da atmosfera, no qual a energia solar que entra no sistema é balanceada pela energia termal irradiada, pois de outra forma o sistema apresentaria mudanças contínuas no balanço energético até que um novo equilíbrio fosse atingido.

Para Liou (2002), a presença de nuvens incrementa o percentual de energia solar refletida de volta ao espaço. Esse *efeito de albedo* causa então um resfriamento do sistema Terra-atmosfera. Por outro lado, as nuvens também reduzem a radiação termal emitida para o espaço, absorvendo o fluxo de radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre e pela própria atmosfera abaixo da camada de nuvens. Esse é o *efeito estufa*, o qual gera um aquecimento do sistema Terra-atmosfera.

A constante solar (S) é a irradiância solar correspondente à distância média entre a Terra e o Sol disponível em um metro quadrado de área voltada para o Sol no topo da atmosfera, sendo seu valor estimado em 1366 Wm^{-2}. A área de sessão transversal que intercepta o fluxo solar é πr^2, mas a área esférica da Terra é $4\pi r^2$, de forma que o fluxo incidente efetivo seja de aproximadamente 342 Wm^{-2}, ou seja, um quarto do valor de S.

$$S / 4 \approx 342\ Wm^{-2} \qquad (5.43)$$

Considerando um albedo global estimado em 30% a partir de dados de satélites (JACOBOWITZ *et al.*, 1984, *apud* LIOU, 2002), cerca de 239 Wm^{-2} entram na atmosfera e se tornam disponíveis ao sistema. Para manter o equilíbrio energético no topo da atmosfera, essa mesma quantidade de energia deve ser emitida para o espaço.

A partir da Lei de Stefan-Boltzman pode-se obter a temperatura média teórica do sistema terra-atmosfera:

$$239 = \sigma T^4 \qquad (5.44)$$

Sendo:

$\sigma = 5{,}6697 \times 10^8$ W m^2 K^{-4} (constante de Stefan-Boltzmann);

Assim, a Terra teria uma temperatura de cerca de 255 K para manter o equilíbrio do sistema. Contudo, a temperatura média observada é de cerca de 290 K. Essa diferença entre as temperaturas teórica e observada é atribuída ao chamado *efeito estufa* (AMBAUM, 2010).

A energia emitida pelo sistema terra-atmosfera é a infravermelha termal (IR). Medições feitas a partir do satélite Nimbus 4 mostram que a distribuição espectral de irradiação terrestre é muito próxima a de um corpo negro com temperatura de 290 K. Entretanto, percebe-se que parte da radiação emitida é retida, supostamente pelo efeito-estufa (LIOU, 2002).

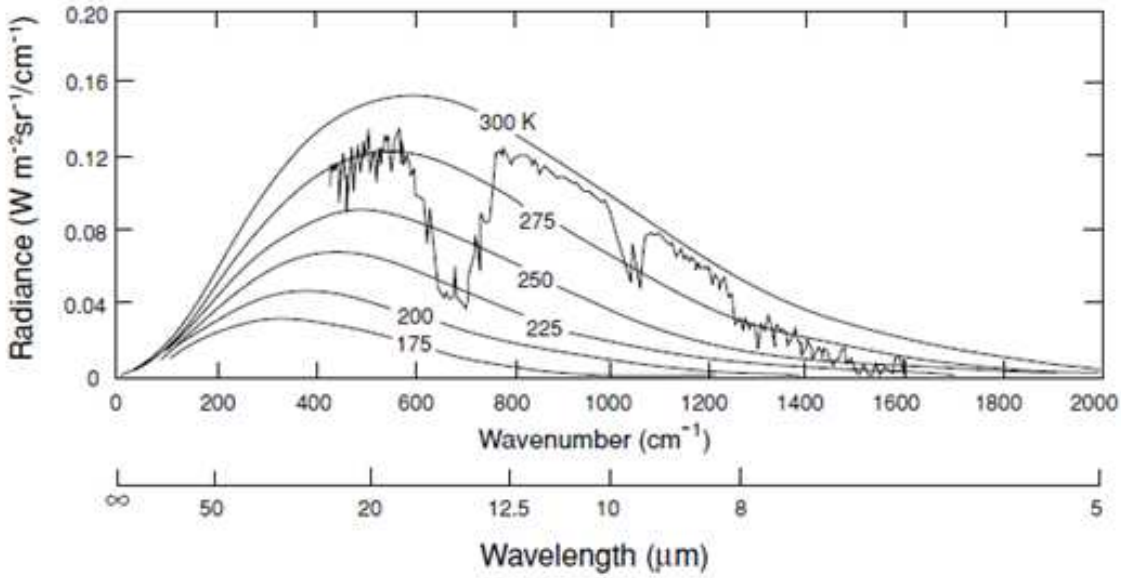


Figura 42: Curvas de radiância teóricas para diferentes temperaturas atmosféricas e a emissão de radiação IR da Terra, medida a partir do satélite Nimbus 4.
Fonte: Liou (2002).

Considerando a Terra um corpo negro, a Lei de Planck mostra que sua distribuição espectral de radiação emitida se concentra na faixa do infravermelho termal. Satélites da série NIMBUS confirmaram que a o espectro de emissão terrestre é bem próximo ao de um corpo negro com temperatura próxima a 290 K. Dessa forma, se o topo da atmosfera emite radiação à temperatura de 255 K, fica evidente que parte da radiação infravermelha fica retida no sistema (LIOU, 2002).

A radiação solar, concentrada nos comprimentos de onda mais curtos, com pico em torno de 0,5μm, é denominada radiação de ondas curtas. Já a

radiação emitida pela Terra, concentrada nos comprimentos de onda maiores, em torno de 10μm, é chamada de radiação de ondas longas (LIOU, 2002).

O modelo de balanço de radiação primordial consiste em calcular a diferença entre o fluxo solar absorvido pelo sistema terra-atmosfera e o fluxo de saída de radiação de onda longa (LIOU, 2002).

$$F = (1 - \alpha)\, Q - F_{ir} \qquad (5.45)$$

Sendo:

F = fluxo radiativo;

α = albedo planetário;

Q = fluxo de radiação solar de entrada;

F_{ir} = fluxo de radiação infravermelha de saída.

Um modelo simplificado do sistema terra-atmosfera pode assumir a atmosfera como opaca à radiação de onda-longa (εLW ≈ 1) e transparente à radiação de onda-curta (εSW ≈ 0). Considerando a atmosfera como uma camada única, livre de nuvens, a uma temperatura uniforme TA, em um sistema em equilíbrio dinâmico no qual os fluxos de entrada e saída de energia estão balanceados, pode-se estimar os balanços de energia no topo da atmosfera (TOA), na atmosfera (ATM) e na superfície (SFC) (AMBAUM, 2010).

$$\text{TOA: } (S/4) = \alpha\,(S/4) + \sigma\, T_a^4 \qquad (5.46)$$

$$\text{ATM: } 2\,\sigma\, T_a^4 = \sigma\, T_e^4 \qquad (5.47)$$

$$\text{SFC: } \sigma\, T_e^4 = \sigma\, T_a^4 + (1 - \alpha)\,(S/4) \qquad (5.48)$$

Onde:

α = 0,3 (albedo);

T_a = Temperatura da atmosfera;

T_e = Temperatura da superfície terrestre;

O fator de dois no balanço atmosférico é devido ao fato da atmosfera emitir radiação para a Terra e para o espaço. Essas três equações com duas variáveis podem ser substituídas entre si para originar duas equações.

$$T_a = ((1 - \alpha)\, S\, (4\,\sigma)^{-1})^{(1/4)} \approx 255 \text{ K} \qquad (5.49)$$

$$T_e = 2^{(1/4)}\, T_a \approx 303 \text{ K} \qquad (5.50)$$

Se o modelo considerar que a atmosfera não é opaca à radiação de onda-longa e ainda que haja outros processos de transferência de calor, como calor latente e calor sensível, o modelo de balanço radiativo pode ser visto como:

TOA: $(S/4) = \alpha (S/4) + \varepsilon LW \sigma T_a^4 + (1 - \varepsilon LW) \sigma T_e^4$ (5.51)

ATM: $2 \varepsilon LW \sigma T_a^4 = \varepsilon LW \sigma T_e^4 + H$ (5.52)

SFC: $\sigma T_e^4 + H = \varepsilon LW \sigma T_a^4 + (1 - \alpha) (S/4)$ (5.53)

Esse sistema de equações fornece a seguinte solução para T_e:

$(1 - \varepsilon LW / 2) \sigma T_e^4 = [(1 - \alpha) S0/4 - (H / 2)]$ (5.54)

Pode-se assim perceber que a temperatura da superfície terrestre aumenta proporcionalmente à emissividade de ondas longas (εLW) e decresce com a transferência de calor (H) (AMBAUM, 2010).

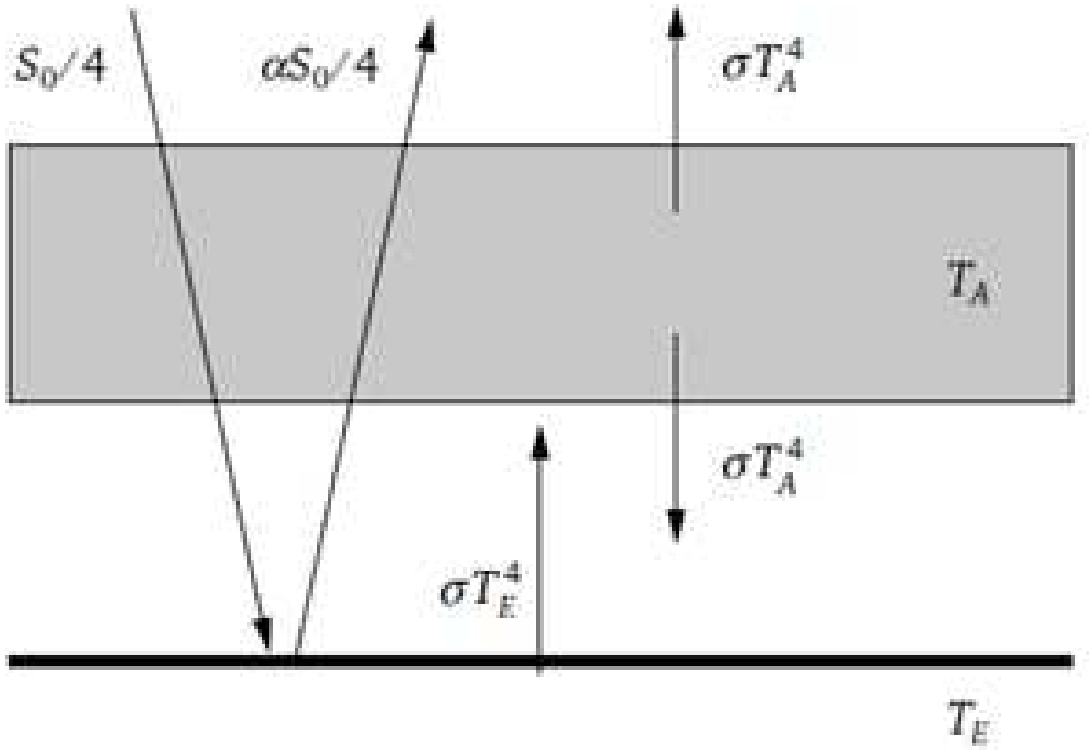


Figura 43: Modelo de fluxo radiativo. O sistema é composto por uma atmosfera homogênea, livre de nuvens, a uma temperatura T_A, com emissividade para ondas longas igual a um e emissividade para ondas curtas igual a zero. O albedo planetário para ondas curtas é provido apenas pela superfície terrestre.
Fonte: Ambaum (2010).

Dentre os diversos mecanismos de retroalimentação do Sistema Terra, o albedo é um dos mais complexos. Em um mundo mais quente, por exemplo, haveria menor presença de gelo nos polos, de forma que o albedo reduzido nessas regiões possibilitaria maior absorção da energia solar, que por sua vez esquentaria ainda mais a superfície, em um mecanismo de retroalimentação positiva. Certamente essa é uma análise simplificada, pois a cobertura de gelo dos polos também é função das circulações oceânica e atmosférica, as quais seriam diferentes em um cenário onde o planeta fosse mais quente. Da mesma forma, a cobertura de nuvens também possui mecanismos ainda pouco conhecidos que podem gerar retroalimentações tanto positivas quanto negativas, pois ao mesmo tempo em que compõe três quartos do albedo

planetário, a cobertura de nuvens também provoca retenção de radiação de ondas longas próxima à superfície. Entender esses mecanismos de retroalimentação é hoje grande desafio para os climatologistas (AMBAUM, 2010).

O albedo global, estimado a partir de mensurações de satélite, é de aproximadamente 30% (JACOBOWITZ *et al.*, 1984 *apud* LIOU, 2002). Este é o resultado de múltiplos processos de espalhamento e reflexão envolvendo tamanho de moléculas, aerossóis, nuvens e absorção atmosférica e da superfície (LIOU, 2002).

As nuvens, as quais ocupam pelo menos 50% dos céus em escala global são importantes reguladoras do balanço de radiação. Sua presença incrementa a reflexão de radiação solar de volta ao espaço, o que é chamado de *albedo solar*, o qual normalmente provoca um resfriamento do sistema. Por outro lado, as nuvens também reduzem a radiação termal que escapa para o espaço através da absorção de parte do fluxo e emitindo radiação termal em direção à superfície. Este processo, conhecido como *efeito estufa* provoca um aquecimento do sistema. Contudo, a radiação disponível no sistema terra-atmosfera e o aquecimento diferencial deste são regulados pela extensão horizontal das nuvens, de sua fase termodinâmica, de seu conteúdo de gelo e de líquido e da distribuição do tamanho das partículas (LIOU, 2002).

A partir da noção de equilíbrio radiativo, o fluxo radiativo na superfície pode ser dado por:

$$F(0) = F_{\downarrow s}(0)\,(1 - \alpha_s) - [\varepsilon_s \sigma T_s^4 - \varepsilon_s F_{\downarrow ir}(0)] \qquad (5.55)$$

Onde:

$F_{\downarrow s}(0)$ = fluxo solar atingindo a superfície;

α_s = albedo da superfície;

ε_s = emissividade da superfície (que em equilíbrio termodinâmico é igual à absortividade);

T_s = temperatura da superfície;

$F_{\downarrow ir}(0)$ = fluxo infravermelho descendente da atmosfera para a superfície;

Liou (2002) explica que os dois primeiros termos à direita da equação são a combinação de energias de ondas curta e longa, respectivamente, à superfície. Ambos não podem ser medidos diretamente por satélites.

Outro modelo climatológico simples para o sistema terra-atmosfera é um que considere a terra e a atmosfera como um todo e calcular a temperatura a partir do balanço de radiação solar incidente e de radiação térmica emitida (LIOU, 2002).

$$\pi r^2 (1 - \alpha)\, S = 4\, \pi r^2 \sigma T_e^4 \qquad (5.56)$$

Sendo:

πr^2 = área de sessão da Terra que intercepta o fluxo solar incidente;

$4 \pi r^2$ = área esférica de emissão em todas as direções.

Entretanto, Liou (2002) ainda ressalta que a temperatura não pode ser relacionada diretamente à constante solar e ao albedo. A temperatura sempre estará relacionada à transparência da atmosfera às radiações solar e termal.

$$T^4 = Q\,[2\,(1 - r) - A] / \sigma\,(2 - \varepsilon)] \qquad (5.57)$$

$$T_a^4 = Q\,[A + \varepsilon\,(1 - r - A) / [\sigma\,\varepsilon\,(2 - \varepsilon)] \qquad (5.58)$$

Nesse caso:

T = temperatura da superfície;

T_a = temperatura da atmosfera;

A = absortividade da radiação solar;

ε = emissividade de infravermelho termal;

Liou (2002) comenta que essas equações são altamente não lineares e com muitos termos interconectados, de forma que é difícil identificar a sensitividade da temperatura em relação ao efeito dos parâmetros radiativos.

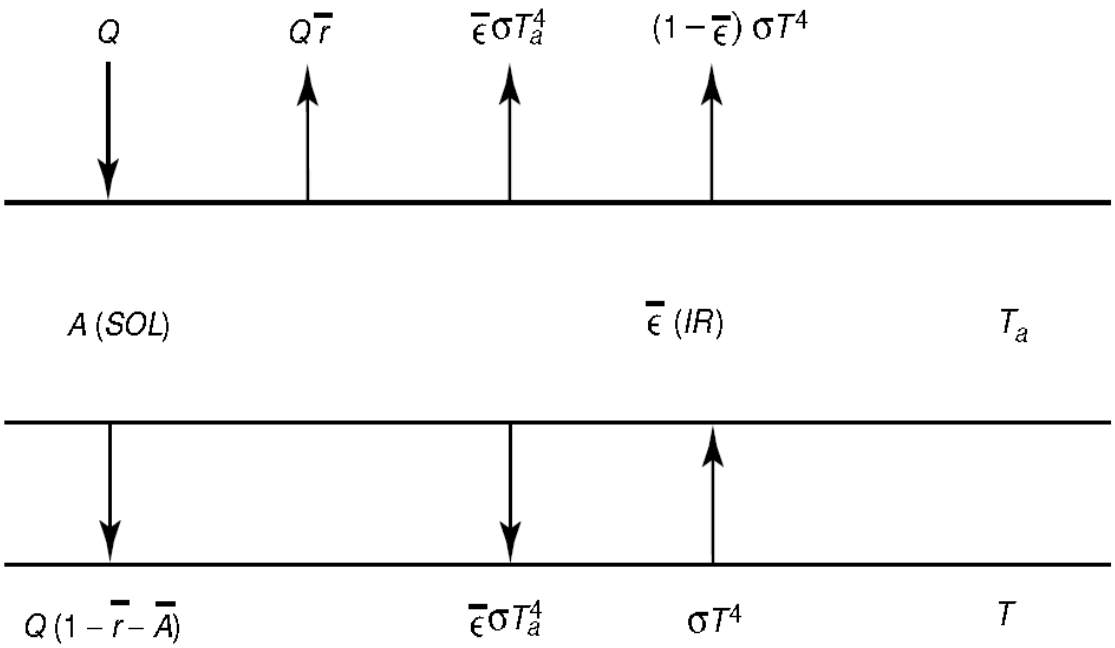


Figura 44: Modelo de equilíbrio radiativo de duas camadas, com influxo solar Q.
Fonte: Liou (2002).

A partir de um albedo global de 30% e do fluxo solar incidente de 342 Wm^{-2}, tem-se que cerca de 239 Wm^{-2} estão efetivamente disponíveis dentro do

sistema terra-atmosfera. Para manter o equilíbrio radiativo o sistema terra-atmosfera deve emitir para o espaço essa mesma quantidade de energia (LIOU, 2002).

A superfície, à 288 K, emite para cima cerca de 390 Wm^{-2}, sendo que parte dessa energia é absorvida pela atmosfera ou refletida de volta à superfície. Contudo, a atmosfera contribui emitindo radiação termal tanto para baixo quanto para cima, permitindo que o sistema emita para o espaço os 239 Wm^{-2} necessários para tingir o equilíbrio radiativo.

Liou (2002) explica que para obter os demais componentes envolvendo o fluxo solar incidente, o fluxo infravermelho descendente e o fluxo solar absorvido na atmosfera, são usadas temperaturas atmosféricas padrão e perfis de composição, incluindo gases traço e uma nebulosidade média global, além de informações sobre quantidades de aerossóis. Assim, calcula-se que o fluxo solar atingindo a superfície é de cerca de 189 Wm^{-2}, enquanto o fluxo solar refletido é de 28 Wm^{-2}, a partir de um albedo de superfície global estimado em 15%. Já a radiação solar absorvida pela superfície é de 161 Wm^{-2}. A emissão de radiação termal descendente pela atmosfera é calculada em cerca de 324 Wm^{-2}, de forma que a superfície tenha uma perda de aproximadamente 66 Wm^{-2}.

Dessa forma, a partir do fluxo solar absorvido pela superfície, da radiação infravermelha emitida e da recebida a partir da atmosfera, estima-se um ganho de 95 Wm^{-2} pela superfície. Para manter o equilíbrio radiativo, essa energia é transportada por fluxos de calor sensível e latente. Como a razão de perda de calor sensível por calor latente, à superfície, é de cerca de 0,27 – conhecida como razão de Bowen – os fluxos de calor latente e de calor sensível são respectivamente estimados em 69 Wm^{-2} e 26 $Wm^{-2.}$ Ressalta-se que o calor latente da condensação liberado nas precipitações e o calor sensível envolvido em processos de condução e convecção são fundamentais para que a superfície terrestre não atinja temperaturas superiores à observada, em torno de 288 K (LIOU, 2002).

Pela diferença os fluxos de radiação no topo da atmosfera e na superfície, estima-se que o fluxo solar absorvido pela atmosfera tenha um valor em torno de 78 Wm^{-2} (LIOU, 2002).

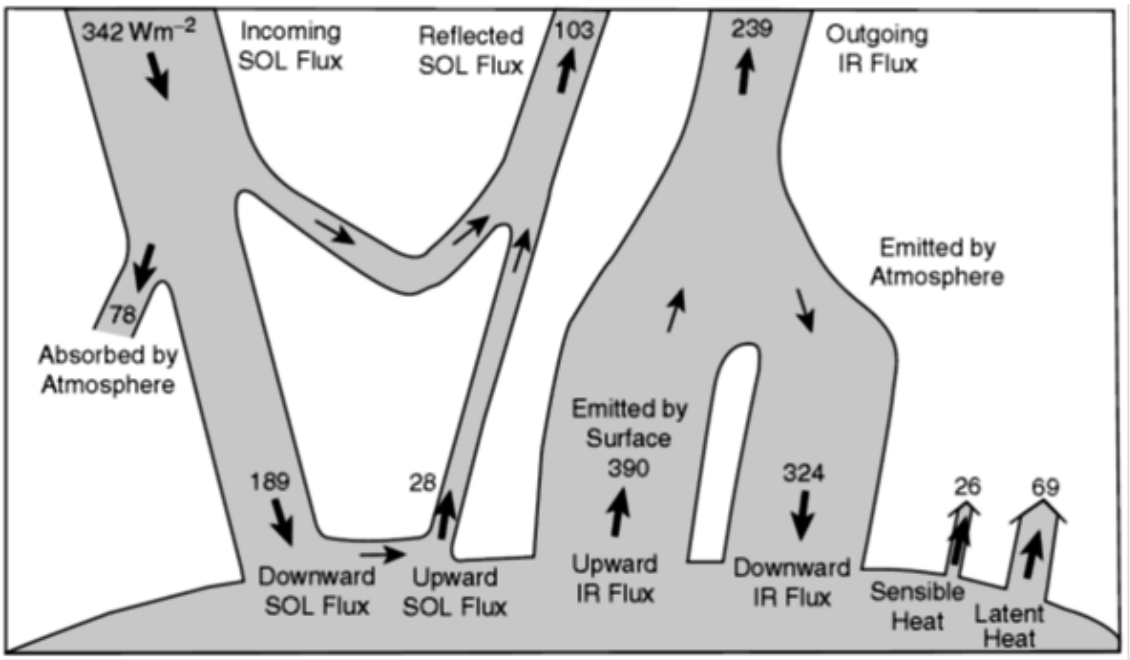


Figura 45: Balanço radiativo do sistema superfície-atmosfera.
Fonte: Liou (2002).

Dentro do sistema superfície-atmosfera o equilíbrio energético é atingido pelo balanço de fluxos radiativos e convectivos. Os fluxos convectivos envolvendo calor latente e calor sensível são controlados por movimentos em várias escalas, entretanto, todo o movimento vertical associado ao transporte de calor é geralmente classificado como convecção (LIOU, 2002).

Uma das principais preocupações em estudos climáticos atuais é o impacto do aumento de dióxido de carbono oriundo da queima de combustíveis fósseis na temperatura da superfície terrestre. Estima-se que metade do dióxido de carbono liberado permaneça na atmosfera enquanto o resto é absorvido pelos oceanos e pela biomassa (LIOU, 2002).

Para Liou (2002) o dióxido de carbono absorve significativamente radiação IR na banda de 15μm, entre 600 e 800 cm^{-1}. Essa região espectral é aquela correspondente à máxima intensidade da função de Planck para um corpo negro a 290 K. O vapor d'água absorve radiação infravermelha na banda de 6,3μm e na banda rotacional – respectivamente de 1200 a 2000 cm^{-1} e abaixo de 500 cm^{-1}.

5.5.1. Interações moleculares com a radiação eletromagnética

A absorção ou a emissão de radiação por um átomo ocorrem quando um elétron sofre transição de um estado energético para outro. Como os estados são quantizados, o elétron apenas transita para outra camada se houver absorção ou emissão em uma frequência específica (AKEMI, 2013).

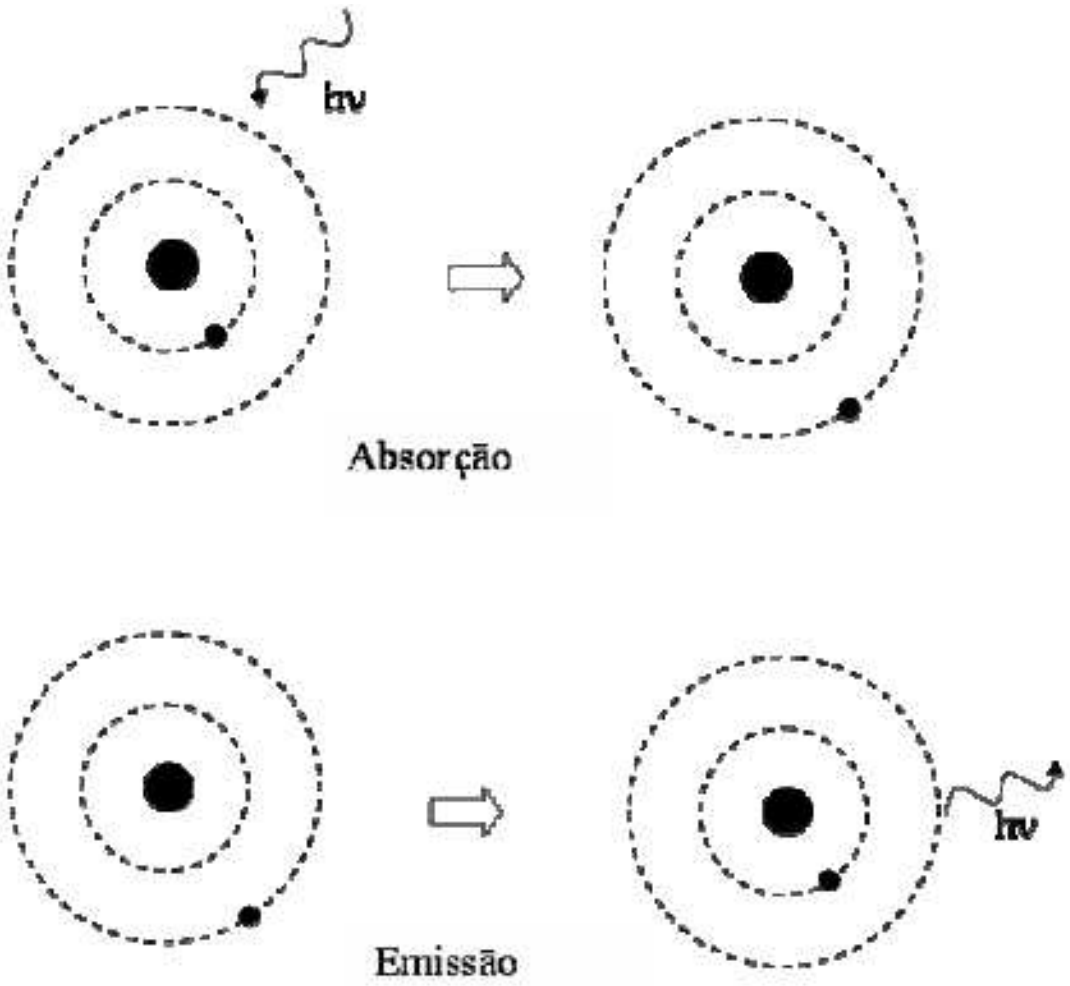


Figura 46: Ilustração esquemática dos processos de absorção e emissão de radiação eletromagnética por um átomo.
Fonte: Akemi (2013).

Nas moléculas, o processo é mais complexo do que no átomo, uma vez que elas possuem diversas formas de energia interna, havendo três tipos possíveis de espectro de emissão: linhas definidas com largura finita; séries de linhas denominadas bandas espectrais; espectro contínuo com intervalo amplo de comprimento de onda.

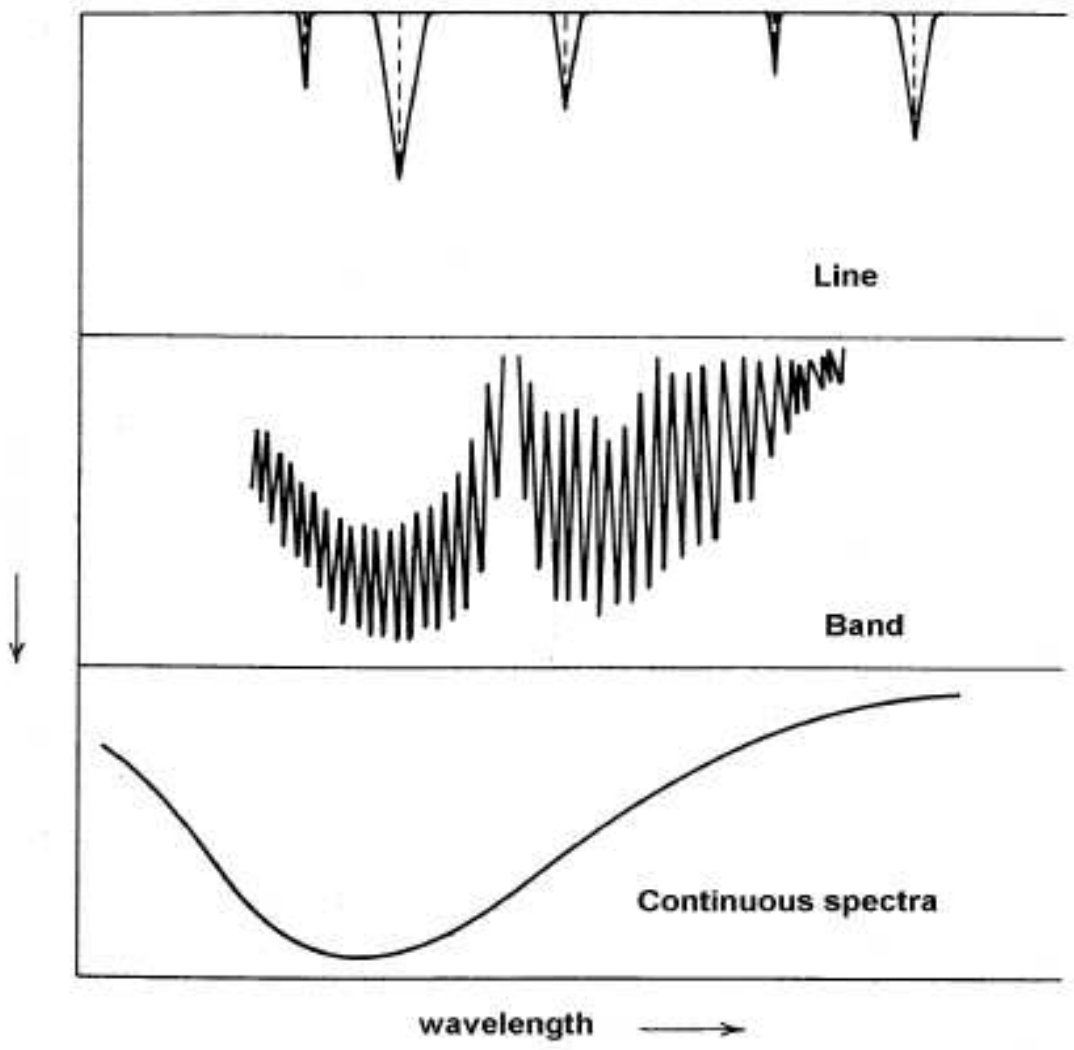


Figura 47: Tipos de espectro de absorção e emissão.
Fonte: Sokolik (2013).

A geometria molecular é muito importante na compreensão de sua energia interna, podendo ser moléculas lineares, esféricas e assimétricas.

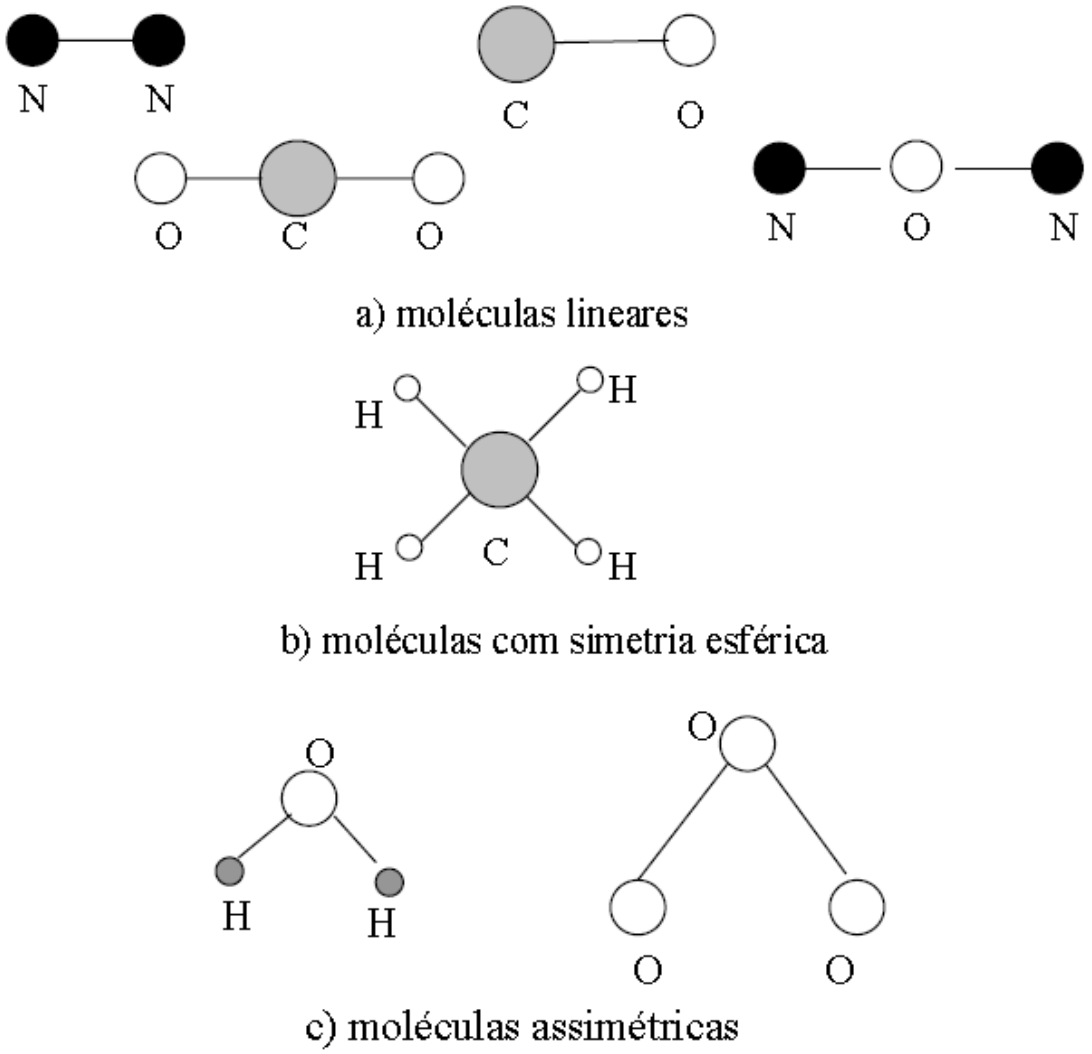


Figura 48: Ilustração esquemática do arranjo geométrico dos átomos em diferentes moléculas. Fonte: Akemi (2013).

A energia total (U) de uma molécula pode ser obtida pela soma da energia cinética de rotação (U_{rot}), da energia cinética de vibração (U_{vib}), da energia eletrônica (U_{el}) e da energia cinética de translação (U_{tr}) (AKEMI, 2013).

A U_{rot} é a energia interna equivalente à radiação eletromagnética do infravermelho distante e das micro-ondas, de forma que ao absorver esse tipo de radiação uma molécula sofre rotação sobre seu centro de gravidade (AKEMI, 2013).

A U_{vib} é a energia que faz as moléculas vibrarem sobre suas posições de equilpibrio ao absorverem radiação eletromagnética da região espectral do infravermelho (AKEMI, 2013).

A U_{el} é aquela envolvida nas transições dos elétrons entre níveis energéticos. A radiação necessária para prover esse tipo de energia interna é aquela da região espectral do ultra-violeta e da luz visível (AKEMI, 2013).

Já a U_{tr} é aquela envolvida nas trocas de energia durante as colisões das moléculas. À temperatura aproximada de 300 K, essa energia é equivalente à radiação eletromagnética do infravermelho térmico, que também pode causar vibrações na molécula (AKEMI, 2013).

A partir disso, tem-se que:

$$U_{rot} < U_{tr} < U_{vib} < U_{el} \quad (5.59)$$

Somente moléculas com dipolo elétrico ou magnético possuem energia puramente rotacional. Cargas distribuídas simetricamente implicam na inexistência de momento de dipolo permanente, não havendo, portanto absorção e emissão da faixa do infravermelho distante, sendo transparentes à essa radiação (AKEMI, 2013).

Devido ao arranjo simétrico da molécula, o dióxido de carbono não possui momento dipolo permanente e tampouco banda rotacional. Contudo, uma molécula simétrica pode adquirir momento de dipolo, pois as linhas espectrais relacionadas à vibração apresentam-se próximas às linhas relacionadas à rotação, havendo assim, bandas de vibração-rotação (AKEMI, 2013).

A banda v_1 corresponde à deformação simétrica da molécula e é radiativamente inativa. As bandas v_{2a} e v_{2b}, de mesma energia, correspondem às deformações anguladas e a banda v_3 corresponde à deformação assimétrica, radiativamente mais ativa (SOKOLIK, 2013).

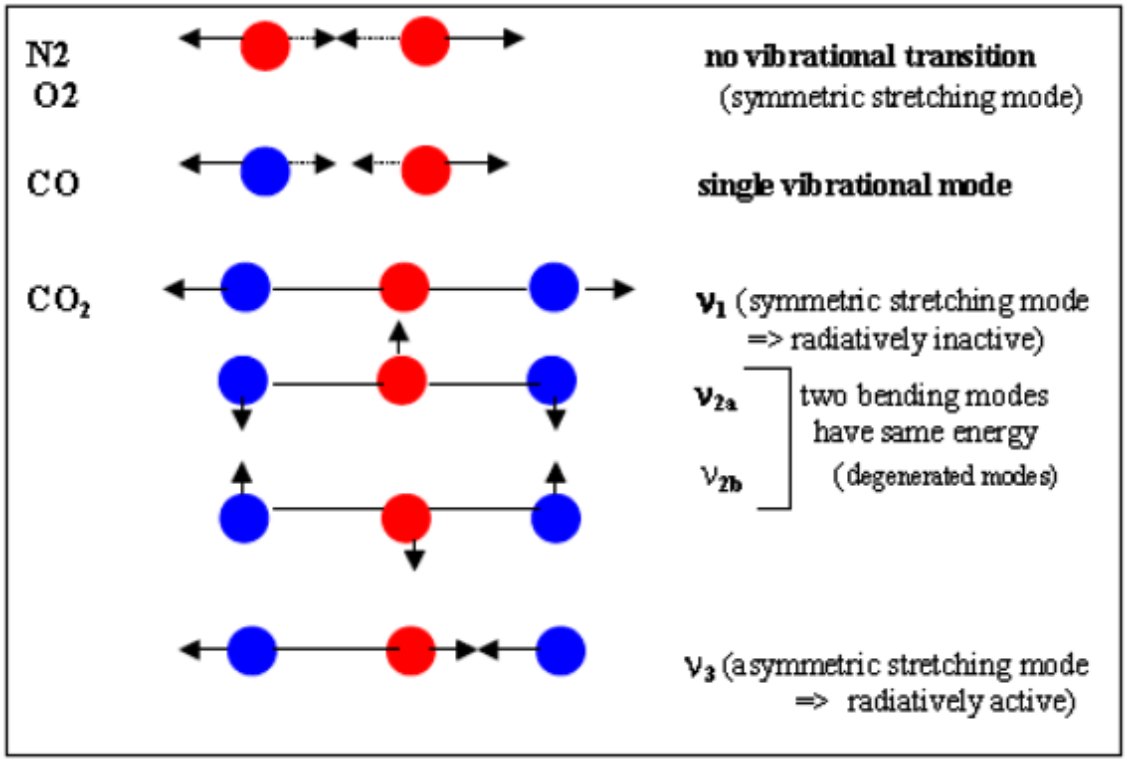


Figura 49: Modos vibracionais de moléculas diatômicas e triatômicas.
Fonte: Sokolik (2013).

Moléculas diatômicas como O_2 e N_2 não possuem movimentos rotacionais e nem vibracionais, não possuindo assim nenhuma atividade na região espectral do infravermelho (AKEMI, 2013).

5.5.2. Absorção de radiação infravermelha por gases atmosféricos

As bandas puramente rotacionais do H_2O vão de 0 a 1000 cm^{-1}, as quais são particularmente importantes no resfriamento da troposfera. Já a banda v_2, em torno de 1594,78 cm^{-1} é a mais importante banda vibracional-rotacional do vapor d'água. A região de 800 a 1200 cm^{-1} – dentro da janela de infravermelho termal – é fortemente atenuada pelo ozônio – banda de 9,6µm – e pelo vapor d'água – no espectro contínuo a partir de 10µm (LIOU, 2002).

A banda de 15 µm de absorção do CO_2 é composta pelas bandas vibracionais-rotacionais v_{2a} e v_{2b}. Devido à diferença de fase entre elas o átomo de carbono no centro da molécula desenvolve um *momentum* angular sobre seu eixo de simetria. Mas além da banda fundamental v_2, outras combinações de bandas nessa mesma região espectral são conhecidas para o dióxido de carbono (LIOU, 2002).

A molécula de ozônio, geometricamente similar à do vapor d'água possui bandas fundamentais nas regiões de 9,6 e 14,27µm, sendo esta última mascarada pela banda de 15µm do CO_2, pois é aparentemente menos significativa na transferência de radiação pela atmosfera. Há ainda uma forte banda de 4,75µm produzida por combinações de bandas (LIOU, 2002).

O efeito estufa é devido à mistura de diversos gases atmosféricos, contudo, faz-se importante notar que não é possível simplesmente somar a capacidade de absorção energética de diferentes gases na mesma banda. Na verdade, quando as frequências de absorção de dois gases são coincidentes, a absorção total é inferior à soma de suas absortividades individuais para aquela faixa do espectro (AMBAUM, 2010).

Esse reciocínio permite identificar a absortividade de radiação pelos gases atmosféricos enquanto um processo ou um subsistema "complexo desorganizado", onde o todo é inferior à soma das partes, fazendo um paralelo com a Teoria da Tectologia de Bogdanov.

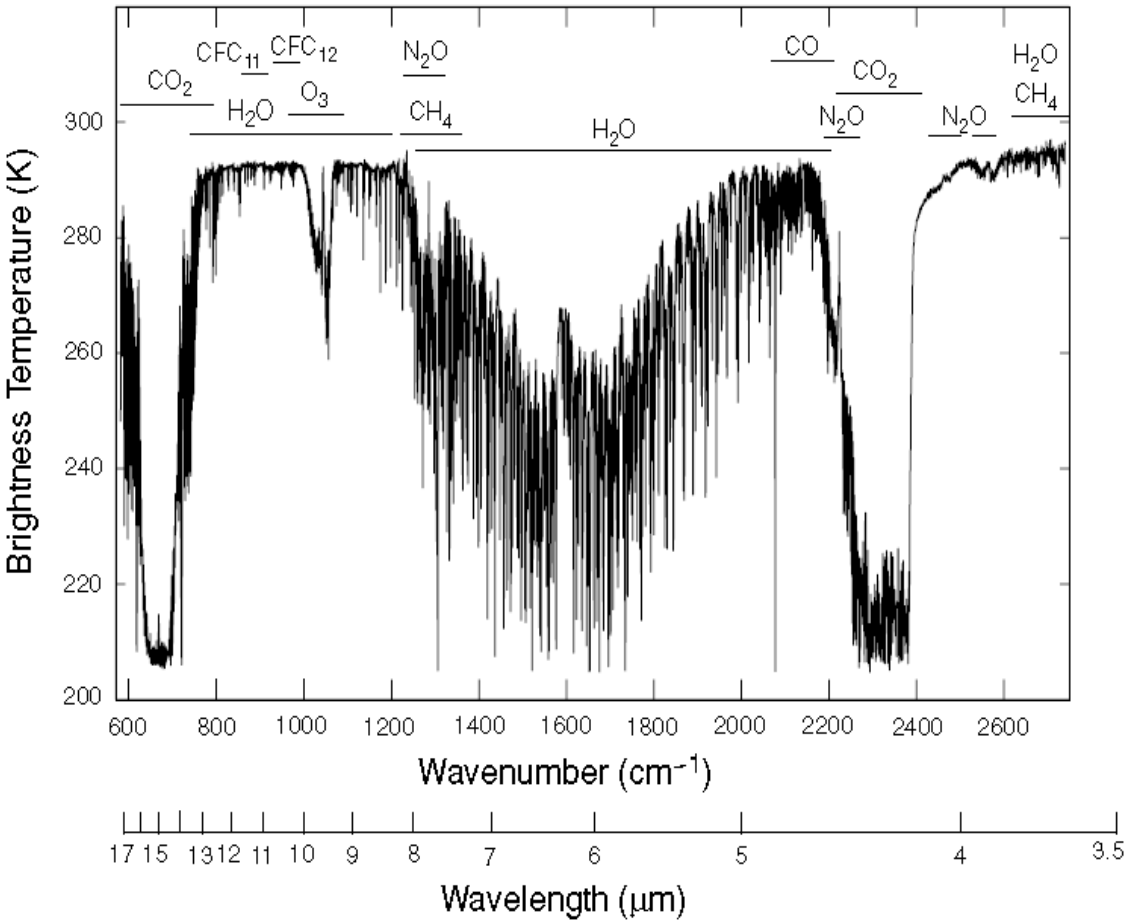


Figura 50: Espectro observado por sensor interferométrico de alta resolução (S-HIS) a bordo do avião da NASA ER-2, o qual mensurou a radiação terminal emitida entre 3,3 e 18 μm sobre o Golfo do México em 2001. As bandas de absorção dos principais gases atmosféricos estão dispostas sobre suas respectivas regiões espectrais.
Fonte: Liou (2002).

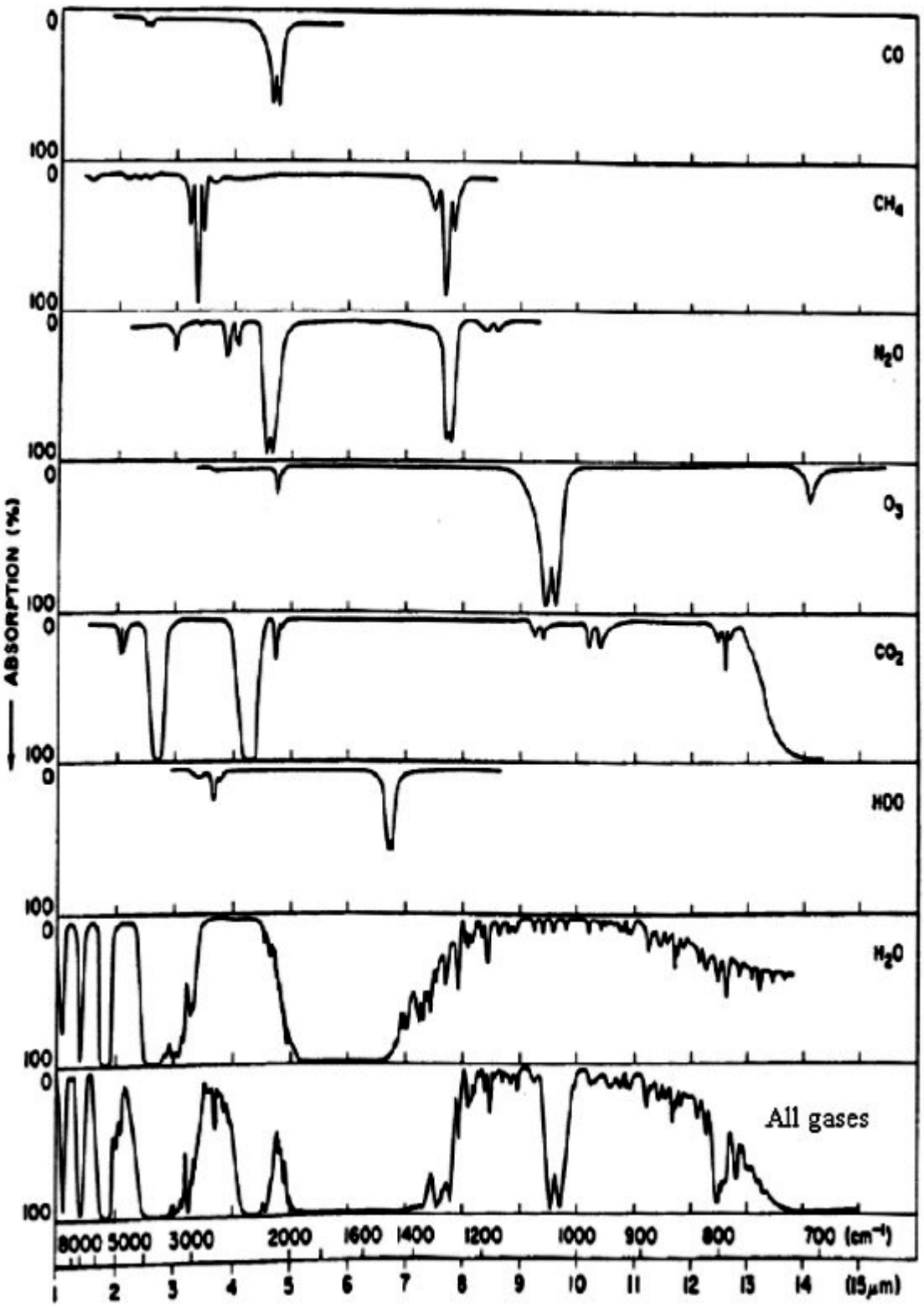


Figura 51: Espectro de baixa resolução de absorção no infravermelho dos principais gases atmosféricos. Observa-se que o comportamento da curva de H_2O é muito semelhante ao da curva de todos os gases atmosféricos somados.
Fonte: Sokolik (2009).

Darrell E. Burch, David A. Gryvnak e John D. Pembrook publicaram em 1970 um estudo denominado "*Investigation of the absorption of infrared radiation by atmospheric gases"* relatando uma série de experimentos realizados pela força

aérea estadunidense. Nesses experimentos em laboratório, amostras de diversos volumes de dióxido de carbono em ambiente com temperatura controlada, eram submetidos a pressões distintas e irradiadas com radiação infravermelha, de forma que pudessem obter as janelas de transmitância do gás para essa faixa do espectro eletromagnético. Eles identificaram tanto janelas intrínsecas quanto janelas induzidas por pressão em amostras com diferentes composições isotópicas de CO_2.

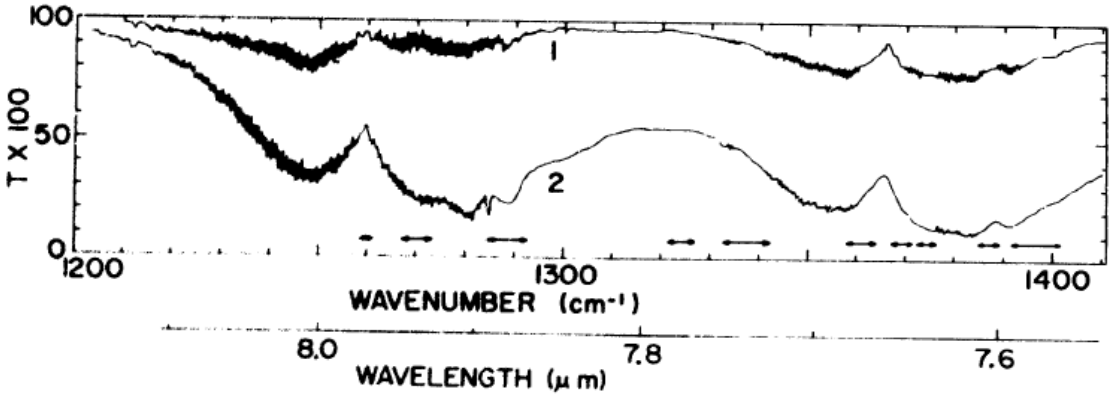


Figura 52: Curvas de transmitância entre 1200 cm^{-1} a 1400 cm^{-1} para duas amostras de CO_2 submetidas a baixas pressões. A amostra 1 esteve sob pressão de 0,25 atm, com um comprimento de 713m, e a amostra 2 esteve sob pressão de 1,05 atm com comprimento de 359m. As setas horizontais mostram intervalos que apresentam também significativa absorção por H_2O.
Fonte: Burch *et al.* (1970).

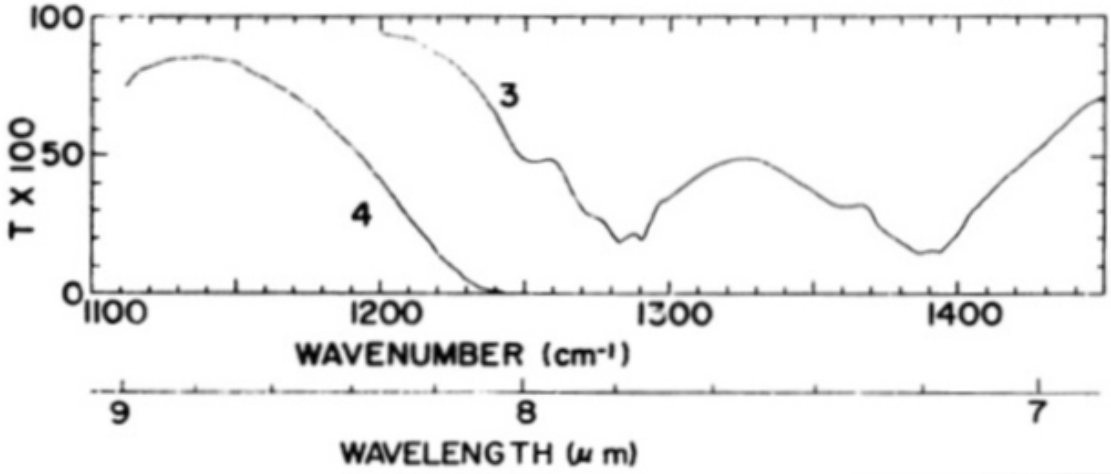
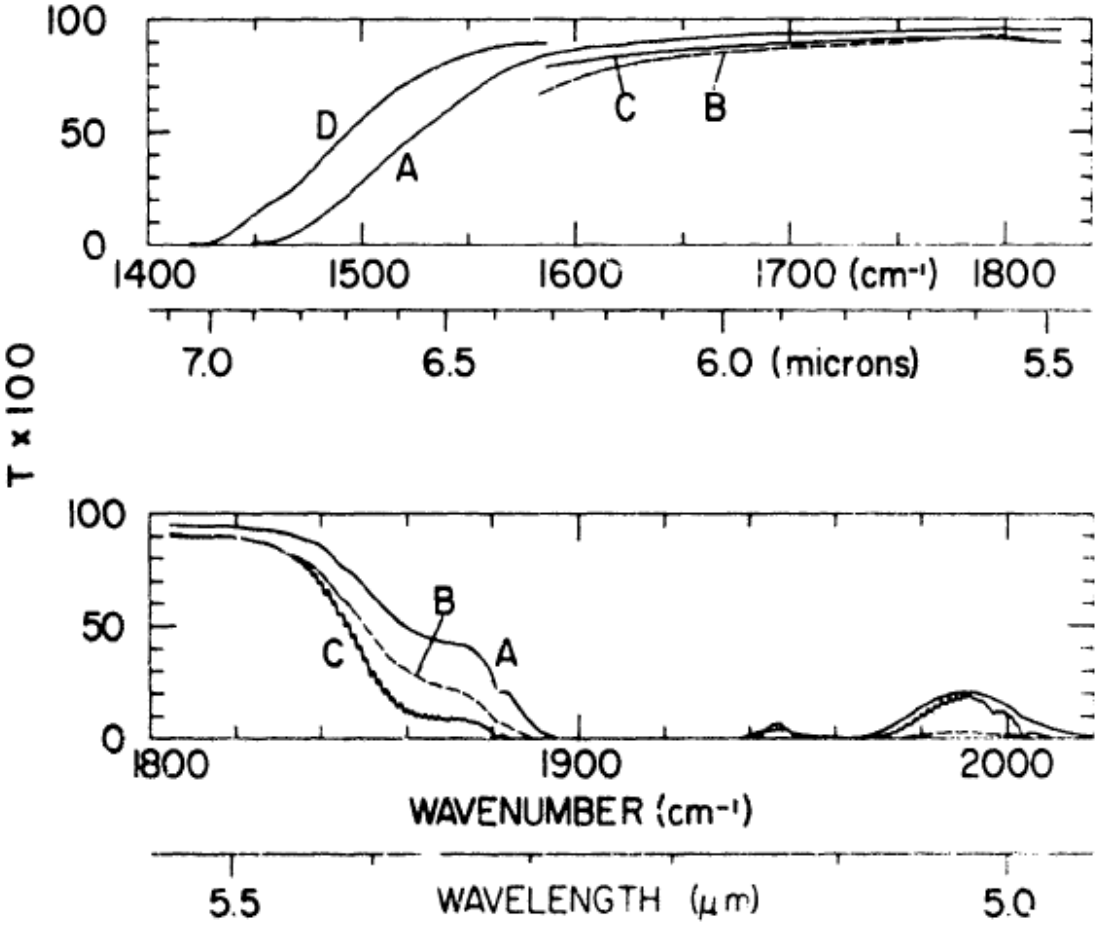


Figura 53: Curvas de transmitância entre 1100 cm^{-1} a 1450 cm^{-1} para duas amostras de CO_2 submetidas a altas pressões. A amostra 3 esteve sob pressão de 3,70 atm e a 4 esteve sob pressão de 14,6 atm, ambas em uma célula de 32,9m de comprimento.
Fonte: Burch *et al.* (1970).



Sample	p (atm)	L (meters)
A	14.6	32.9
B	21.3	32.9
C	2.35	933
D	1.82	1067

Figura 54: Curvas de transmitância de 1400 cm^{-1} a 2020 cm^{-1}, para quatro amostras de CO_2 submetidas a diferentes condições controladas em laboratório. Todas as amostras são de gás puro.
Fonte: Burch *et al.* (1970).

Em uma segunda etapa dos experimentos, para identificar as intensidades das bandas de absorção na região espectral contida entre 1885 e 2132 cm^{-1} foram adicionados nitrogênio e oxigênio às amostras em proporções próximas às atmosféricas, de forma que a transmitância observada pudesse ser a mais próxima possível da transmitância real.

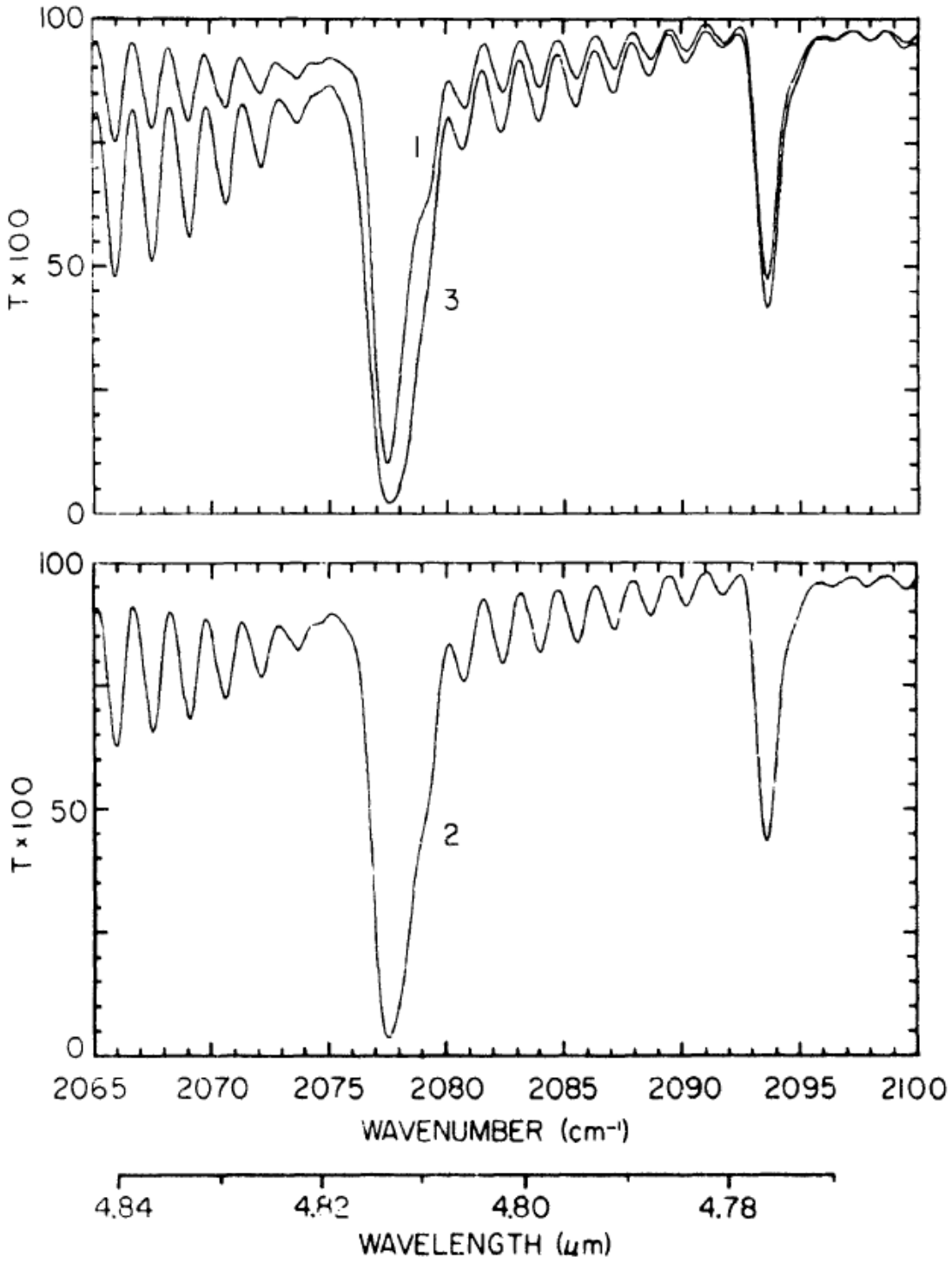


Figura 55: Curvas de transmitância de 2065 cm^{-1} a 2100 cm^{-1}, para três amostras de CO_2 submetidas a diferentes pressões, todas contidas em célula com comprimento de 32,9m. Nesse experimento, para simular o ar atmosférico, foi adicionada à mistura 80% de N_2 e 20% de O_2.
Fonte: Burch *et al.* (1970).

A pressão atmosférica afeta significativamente a absorção de radiação pelos gases atmosféricos, o que torna ainda mais difícil construir modelos de transferência de radiação infravermelha através da atmosfera. Altas pressões aumentam a absortividade dos gases (SOKOLIK, 2009).

5.5.3. O vapor d’água na atmosfera

Para Ambaum (2010) o vapor d’água e o dióxido de carbono são os dois gases estufa mais importantes. Já Liou (2002) afirma que o vapor d’água é o mais importante elemento com relação ao equilíbrio radiativo e à dinâmica atmosférica. Vianello e Alves (1991) também apontam o vapor d’água enquanto elemento de extrema importância, seja formando nuvens, seja através dos fluxos de calor latente e sensível, embora também atribuam significativa importância ao dióxido de carbono enquanto gás de efeito estufa.

Uma vez que os gases de maior presença na atmosfera – O_2 e N_2 – não apresentam significativa absortividade na região do infravermelho e o dióxido de carbono representa menos do 0,4% do volume atmosférico, o vapor d’água se apresenta como principal gás termorregulador atmosférico. A variabilidade da concentração de H_2O na atmosfera o torna um elemento desafiador aos cientistas, os quais continuam a tentar descobrir os mecanismos de retroalimentação envolvendo o vapor d’água na atmosfera.

Como ilustrado na figura 56, a curva de transmitância na banda do infravermelho do vapor d’água apresenta comportamento muito semelhante à curva de todos os gases atmosféricos somados. Fica evidente que a contribuição do dióxido de carbono é mais significante apenas nas faixas de 4 a 5μm e de 13 a 15μm. Já o ozônio mostra maior significância de absorção nas faixas abaixo de 0,35μm e entre 9 e 10μm. Outros gases tem suas janelas de transmitância sobrepostas pelas janelas do vapor d’água.

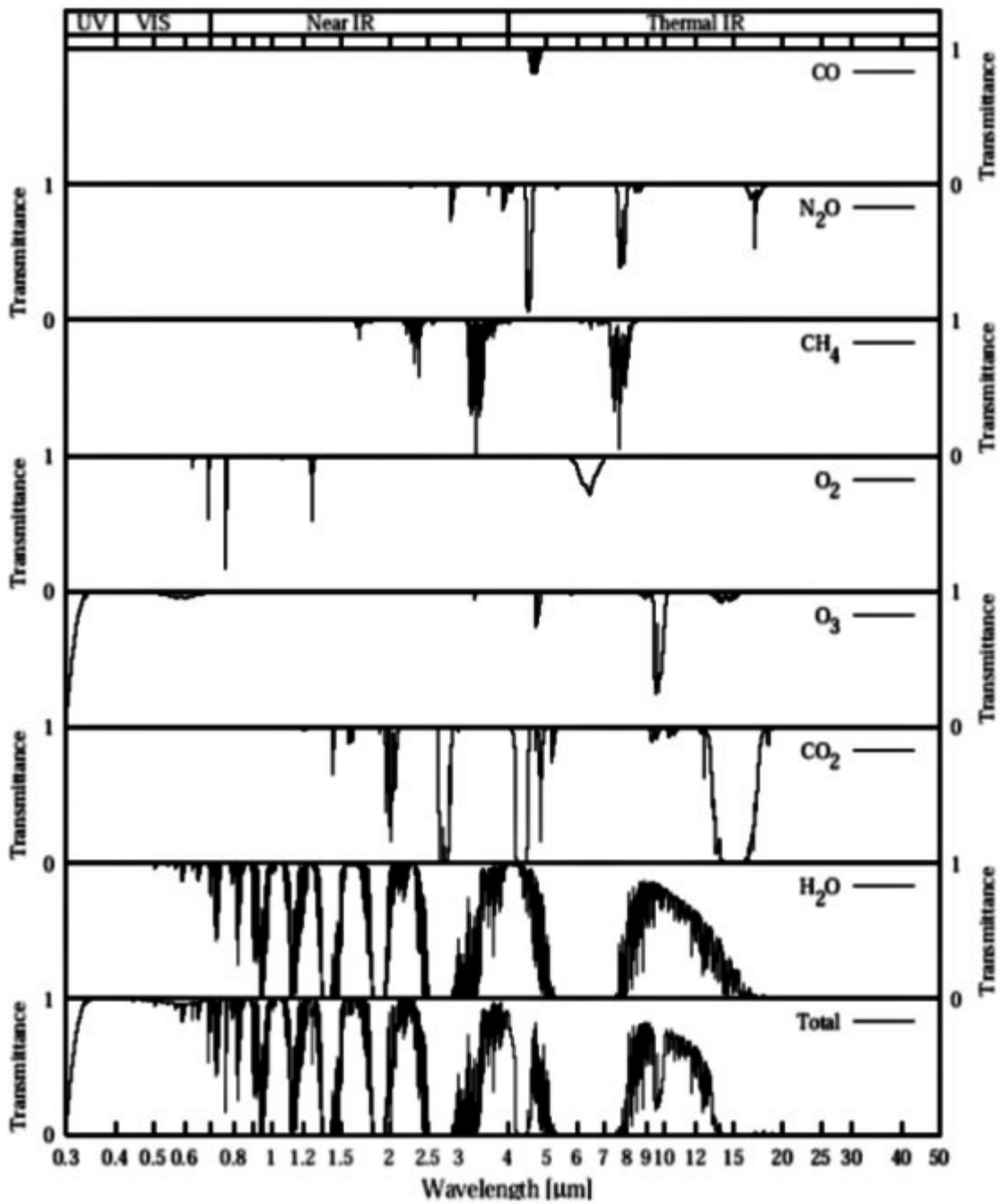


Figura 56: Espectro de transmitância nas regiões do visível e do infravermelho dos alguns dos principais gases de atmosféricos.
Fonte: Sokolik (2009).

6. PALEOECOLOGIA

Cassab (2010) define Paleoecologia como um ramo da paleontologia o qual estuda as relações dos organismos com o meio e entre si, usando para tal dados de paleofauna, paleoflora e outros registros que permitam obter informações sobre a ecologia de tempos pretéritos, como salinidade, produção orgânica, nível de oxigenação e condições climáticas.

Já Dutra (2010) parte da proposição de Abel, em 1935, de que a Paleoecologia tem como principal objetivo a reconstrução teórica das relações entre organismos do passado e seu meio. Contudo, ressalta que as novas teorias da Ecologia, as quais consideram a auto-organização dos seres vivos e a visão sistêmica do universo, foram fundamentais para mudar o foco da Paleoecologia. Os paleontólogos passaram a perceber o registro fóssil enquanto entidade diversa do organismo originário, além de passarem a dar maior atenção aos processos envolvidos na deposição do fóssil. Dessa forma, entender o Sistema Terra moderno, seus processos, suas periodicidades, passou a ser fundamental para permitir uma aproximação dos processos geológicos pretéritos. Nas palavras da autora (*op. cit,* p.345*)*:

> *A visão integrada dos fenômenos e a interdisciplinaridade são hoje, assim, condições indispensáveis para o "fazer" paleoecológico e não podem ser dispensadas por aqueles que aí desejam se especializar.*

Camargo (2005) diz que rochas e fósseis não só contam a história do planeta, mas também denunciam as combinações ecológicas desse passado. Para ele, a Paleoecologia estuda a evolução ecológica planetária, buscando entender sua totalidade a partir da combinação e interconectividade de diversos elementos, como vegetação, clima, entre outros. Citando Salgado-Laboriau (1994), ressalta que a Paleoecologia tem como objetivo estudar a complexa relação entre organismos vivos e o ambiente físico em que eles viviam. Para ela, a falta de informações paleoecológicas é o que fez com que as primeiras teorias da Ecologia fossem baseadas em ecossistemas estáticos e resilientes. Contudo a análise paleoecológica deve ser cautelosa, uma vez que é difícil deduzir as relações biota-ambiente a partir de evidências fósseis.

Para entender ambientes do passado é primordial o conhecimento físico, químico e biológico dos ambientes atuais, tornando a atual modelagem de ecossistemas uma das bases para a reconstrução paleoambiental. Entender as condições de crescimento de certos vegetais atuais, por exemplo, é importante para indicar condições ambientais similares – com devido suporte de evidências nas fácies associadas – em épocas nas quais vegetais de

características taxonômicas e fisionômicas próximas apresentavam certa abundância.

Além disso, a observação da atual conformação geográfica auxilia a modelagem de reconstituição paleoambiental na medida em que permite auferir processos climáticos e oceanográficos pretéritos. Enquanto os continentes se moviam pela crosta a circulação oceânica era alterada, causando processos de ressurgência, regimes climáticos monsonais, amplitudes de marés variadas, entre outros processos que são vistos hoje, mas que podem ter existido em lugares e escalas diferentes (DUTRA, 2010. p. 346).

Pode-se então inferir que a Paleoclimatologia é parte da Paleoecologia enquanto tentativa de construir um modelo climático pretérito através de registros geológicos. O mesmo pode ser dito sobre a Paleoceanografia, a qual procura remontar ambientes oceânicos do passado.

Os requisitos dos organismos pretéritos representam a possibilidade de desvendar seu paleoambiente, seja indicando diretamente o tipo de ambiente no qual viviam – como corais, os quais vivem em mares rasos de águas claras e cálidas – ou indiretamente, indicando barreiras limitantes à sua dispersão – como a incapacidade de se dispersar por massas d'água, cadeias montanhosas, zonas de temperatura adversa, etc (DUTRA, 2010). Dessa forma, a Paleoecologia funciona de maneira reversa à Ecologia, pois parte de dados isolados sobre organismos e ambientes para chegar à integração capaz de reconstituir o meio (MARTÍNEZ; SANTOJA, 1994, *apud* DUTRA, 2010).

6.1. Cautela em Paleoecologia e em prognósticos futuros

Salgado-Laboriau (1994) afirma que ao longo de diferentes períodos, combinações específicas de elementos compuseram diferentes ecologias. Cada era geológica possuiu uma combinação única de elementos atmosféricos, oceânicos, geológicos, florísticos, entre outros. Assim, diferentes estágios ecológicos se sucederam através de reorganização dos elementos componentes do sistema planetário.

A velocidade de mudanças dos elementos ecológicos varia em cada etapa geológica e essas mudanças são irreversíveis (CAMARGO, 2005). As condições ecológicas que possibilitaram a existência de certa espécie no passado não existem mais. Podem ter ocorrido mudanças na composição atmosférica através da liberação de gases por vulcões e pelos oceanos, a conformação dos continentes era diversa e. consequentemente, a circulação oceânica, a precipitação eram diferentes. Até mesmo a inclinação do eixo terrestre, o polo magnético e a excentricidade da órbita planetária eram outros. Diante disso, aquela espécie não se perpetuou, tendo sido substituída em um contínuo processo de mutações, onde a dinâmica orgânica acompanhou à inorgânica na dinâmica da totalidade planetária.

Dentro dessa visão de ecossistemas dinâmicos, Salgado-Laboriau (1994) alerta que as condições ambientais atuais não podem ser comparadas irrestritamente com as do passado, uma vez que estas não mais existem. Complementarmente, Suguio (2010) aponta que não se pode inferir que fenômenos não observados no presente não tenham ocorrido no passado ou não venham a acontecer no futuro. Da mesma forma, então, fenômenos observados no presente não necessariamente ocorreram no passado ou ocorrerão no futuro.

Pode-se pensar a partir disso que comparações de elementos isolados da atualidade com os do passado não são suficientes para deduzir a totalidade do sistema planetário pretérito, tampouco para prevê-la no futuro. Os processos atuais da natureza não podem ser projetados diretamente para entender o passado, pois as relações entre os elementos foram modificadas. Por exemplo, o clima planetário no passado pode ter sido mais ou menos influenciável diretamente pela composição atmosférica, os mecanismos de retroalimentação no balanço de energia podem ter atuado em magnitudes diferentes, produzindo efeitos diferentes daqueles que existem hoje.

Camargo(2005) e Salgado-Laboriau (1994) alertam para o fato de que não se pode considerar o padrão do sistema Terra-Sol do passado como idêntico ao atual. Carneiro, Mizusaki e Almeida (2005) abordam raciocínio semelhante como base para uma restrição ao princípio do Uniformitarismo como originalmente elaborado por Hutton e Lyell.

Suguio (2010) afirma que é muito difícil correlacionar modificações causadas pelos atuais processos naturais com aquelas causadas por processos vigentes a milhões ou até bilhões de anos atrás. Para ele, apenas estudos do Quaternário são passíveis de estabelecimento de elos entre o passado geologicamente pouco remoto e o pressente. Em situações extremamente favoráveis pode-se até estabelecer prognósticos futuros, embora seja isso tarefa bastante complicada.

As causas possíveis dos períodos glaciais e suas mudanças cíclicas entre estádios glaciais e interglaciais têm sido objeto de diversos debates e pesquisas científicas. Para Suguio (2010), as palavras-chave para alcançar esse entendimento são complexidade e interação, de forma que se torna absurdo procurar por um mecanismo único que explique mudanças tão significativas na dinâmica planetária.

As variações climáticas podem ser de curta ou longa duração, tendo causas diferentes, além de abranger variações cíclicas ou escalonadas. A intensidade e a frequência das mudanças cíclicas também variam ao longo do tempo. Suguio (2010) ainda alerta que extrapolações de supostos ciclos podem gerar resultados ilusórios e que as múltiplas causas prováveis de mudanças paleoclimáticas possuem grandes correlações entre si, mas apresentam

resultados diversos, dependendo se possuíram desenvolvimento em cadeia ou em paralelo.

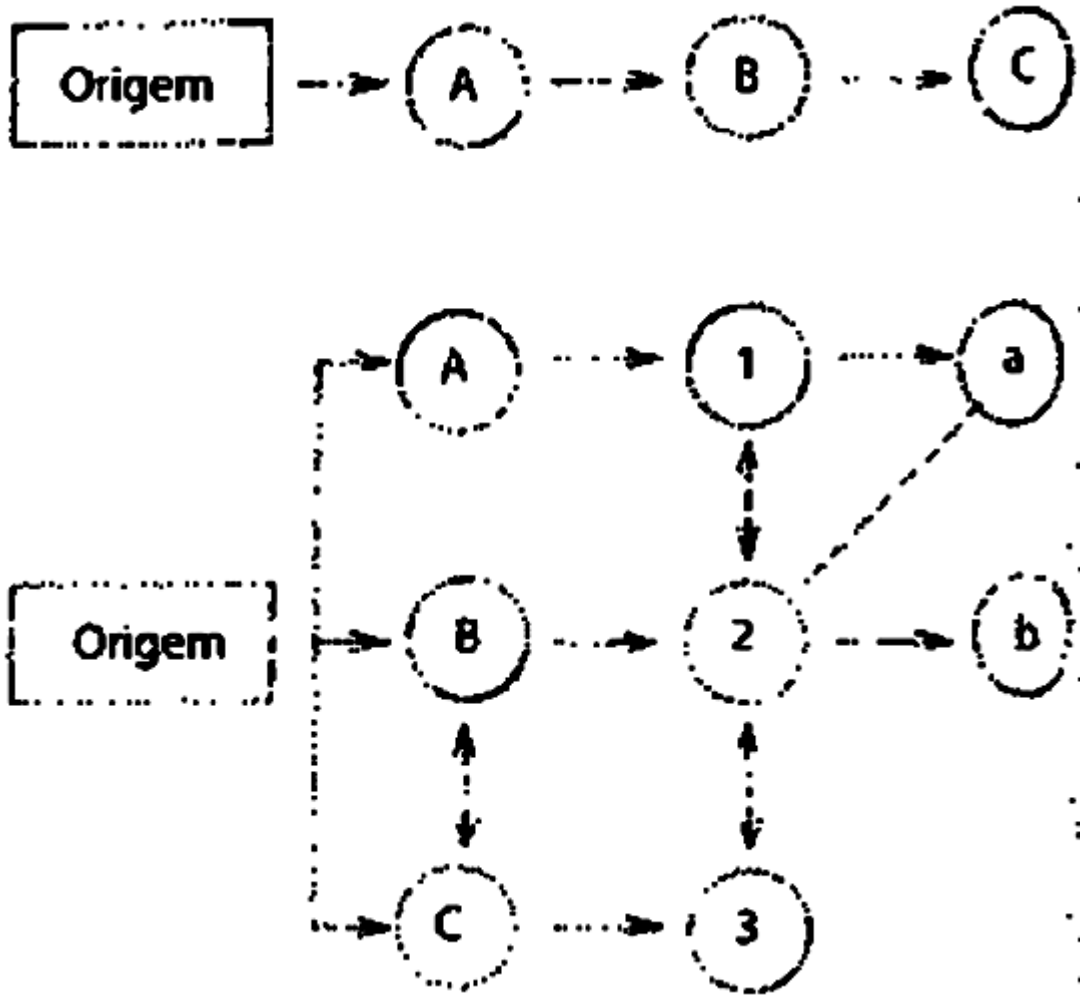


Figura 57: Desenvolvimento de mudanças ecológicas em cadeia e em paralelo.
Fonte: Suguio (2010).

6.2. Fósseis e Paleoecologia

Através de delgadas marcas, que muitas vezes exigem uso de microscópio, podem-se encontrar registros das mudanças paleoclimáticas e da dinâmica terrestre nas últimas centenas de milhões de anos (SUGUIO; SUZUKI, 2010). Através de registros fósseis, por exemplo, pode-se tentar reconstituir a paleoecologia de determinado ambiente, enquanto aproximação à sua ecologia original (SUGUIO, 2010).

A vida na Terra é completamente vinculada às condições ambientais, inclusive climáticas, de forma que a distribuição dos seres vivos é dependente do clima. Com relação à flora, a relação com o clima é muito mais direta, enquanto que os animais, com maior mobilidade e adaptabilidade, possuem relações mais complexas com o clima (SUGUIO, 2010) A partir desse entendimento, é possível utilizar os fósseis como indicadores paleoclimáticos.

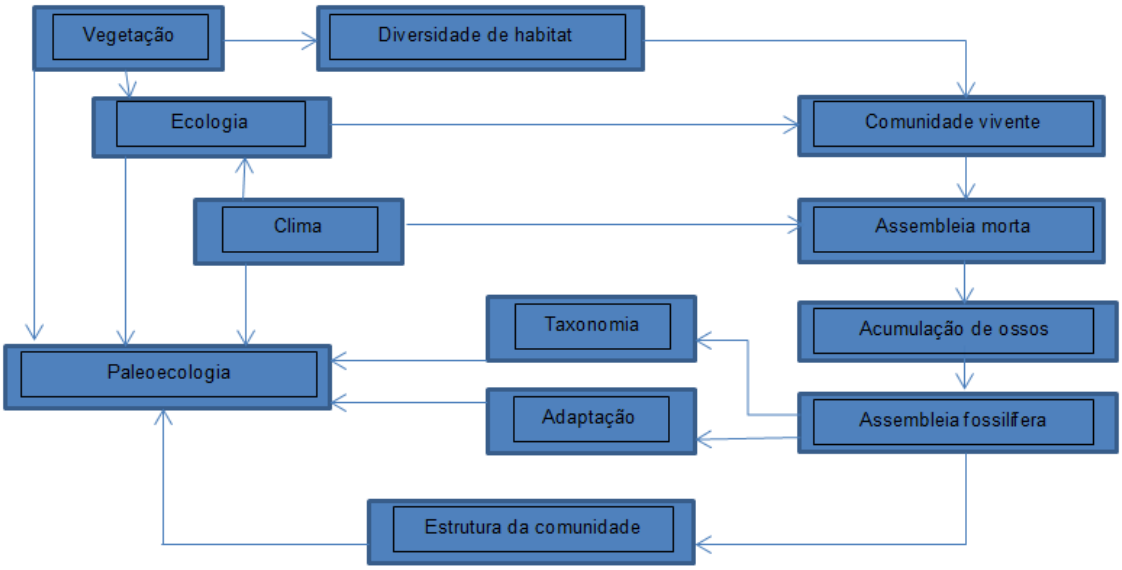


Figura 58: Relações entre Ecologia, Paleoecologia, Taxonomia e fatores que as afetam.
Fonte: Adaptado de Suguio (2010).

Os microrrestos vegetais – pólen, esporos, carapaças de diatomáceas, etc – devido a sua grande ocorrência nos sedimentos, são muito utilizados em estudos paleoecológicos (SUGUIO, 2010). Uma sequência, por exemplo, na qual a abundância de grãos de pólen de plantas arbóreas seja seguida por uma diminuição desses por grãos de pólen de gramíneas, pode indicar a passagem de um clima mais úmido, normalmente de um período interglacial, para um clima mais seco, muitas vezes associado a um estádio glacial.

Outro exemplo de como as assembleias fossilíferas podem ser utilizadas nos estudos paleoecológicos é o dos corais, os quais desenvolvem marcas de crescimento diárias. Essas linhas são mais espessas no verão e mais finas no inverno, constituindo um calendário de coral. Da mesma forma, as espessuras dos anéis de crescimento das árvores seguem ciclos de 11 anos. Acredita-se que sejam reflexos das variações de temperatura, pluviosidade, ventos e insolação. Coincidentemente – ou nem tanto – as manchas solares também seguem ciclos de 11 anos. Mesmo em fósseis de árvores de 100 milhões de anos foram registrados ciclos de 11 anos, sugerindo que desde aquela época o Sol já apresentava essa periodicidade (SUGUIO; SUZUKI, 2010).

Tipos de organismos com condições de sobrevivência bastante restritas, como os corais hermatípicos – construtores de recifes – são bastante úteis nas reconstruções paleoclimáticas. Nesse caso, a necessidade de águas cálidas, com pouca variação de salinidade e boa iluminação, permite obter informações sobre paleotemperaturas, paleosalinidades e paleonível do mar na época em que o coral viveu (SUGUIO, 2010).

Os esqueletos de corais são constituídos por faixas de crescimento anual de aproximadamente 1cm de espessura, podendo alguns viver por mais de 500

anos. A composição de $CaCO_3$ de seu esqueleto permite análises com datação isotópica de carbono e de oxigênio, permitindo reconstituir paleotemperaturas e precipitações ocorridas com precisão de um mês ou menos. As paleotemperaturas obtidas podem ter precisão de cerca de 0,5°C (SUGUIO, 2010).

Já os organismos planctônicos, como os foraminíferos, os radiolários e os cocólitos, possuidores de carapaças calcárias ou silicosas, distribuem-se pelas águas oceânicas até cerca de 100m de profundidade, habitando assim, cerca de 70% da superfície terrestre. Após suas mortes, suas carapaças são depositadas no assoalho marinho e são cobertas por sedimentos. Essas carapaças podem ser obtidas então através de testemunhagens do solo marinho e utilizadas para reconstituição das variações de paleotemperaturas de águas superficiais marinhas (SUGUIO, 2010).

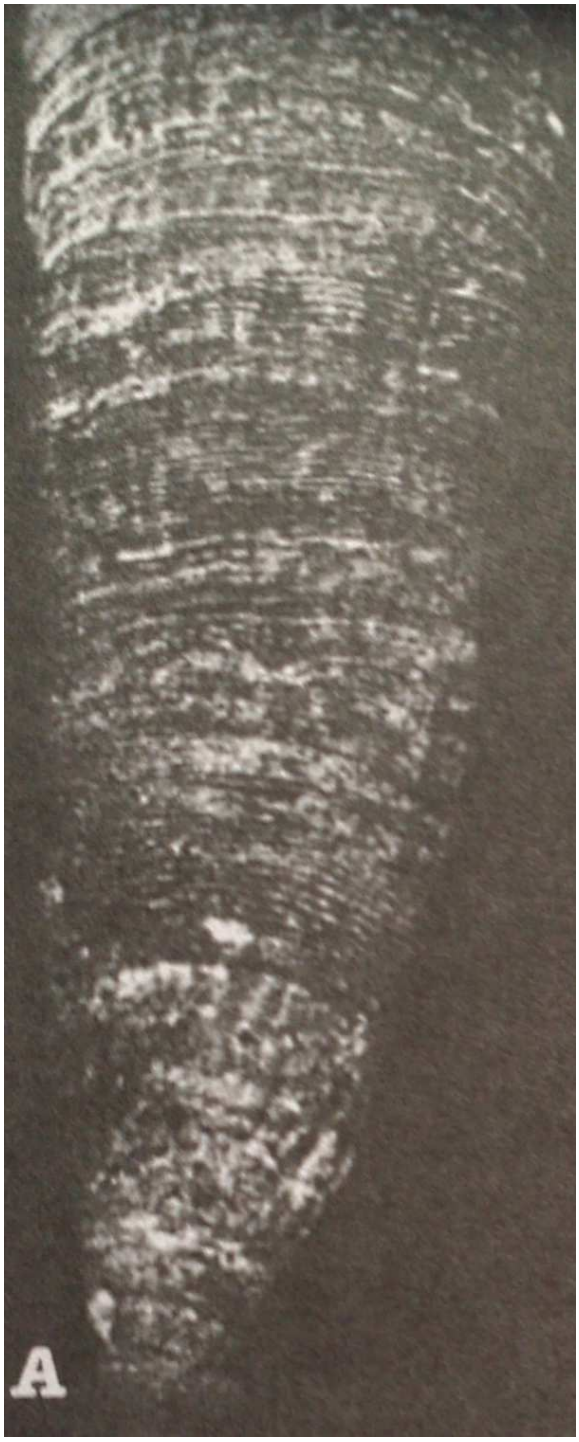


Figura 59: Fóssil de coral com linhas de crescimento diárias, cujos padrões indicam variações sazonais paleoclimáticas.
Fonte: Suguio e Suzuki (2010).

6.3. Datações isotópicas

Isótopos são diferentes espécies atômicas de um mesmo elemento as quais, apesar de possuírem o mesmo número atômico (z), possuem diferentes números de nêutrons (N) em seu núcleo e, consequentemente, diferentes massa atômica (A). A massa atômica, por convenção, é representada como número sobrescrito à esquerda do símbolo do elemento, por exemplo: ^{12}C e

^{13}C, representam respectivamente um átomo de carbono com seis nêutrons e seis prótons e outro com sete nêutrons e seis prótons.

Os isótopos são considerados estáveis quando não alteram sua massa atômica ao longo de sua existência, ao contrário dos chamados isótopos instáveis, ou radioativos, os quais emitem energia e acabam perdendo massa (MARTINELLI *et al.*, 2009).

Os isótopos mais "leves", ou seja, de menor massa atômica, são mais abundantes na natureza. Já aqueles mais pesados são mais raros. Suas reatividades químicas permanecem praticamente inalteradas, entretanto, os isótopos mais pesados possuem velocidades de reação ligeiramente mais lentas (MARTINELLI *et al.*, 2009).

6.3.1. Datação por isótopos estáveis

A previsibilidade da variação isotópica de um elemento em diversos compartimentos de um ecossistema permite que seja determinada a razão entre um isótopo mais raro e aquele mais comum. Essa razão é a composição isotópica (**R**).

Devido à diferença nas velocidades de reação, quando um determinado substrato passa por um processo físico-químico, a composição isotópica do mesmo se apresenta diferente daquela do produto. Denomina-se fracionamento isotópico a variação na proporção entre dois isótopos estáveis presentes em um composto que sofre uma reação (MARTINELLI *et al.*, 2009).

O fator de fracionamento (α) pode ser obtido por:

$$\alpha = \mathbf{R}_{substrato} / \mathbf{R}_{produto} \qquad (6.1)$$

Já a notação "δ" apresenta a ocorrência de uma variação isotópica em relação a um padrão pré-estabelecido:

$$\delta = (\mathbf{R}_{amostra} / \mathbf{R}_{padrão}) - 1 \qquad (6.2)$$

Convenciona-se multiplicar δ por 1000, de forma que partindo das equações 6.1 e 6.2 pode-se obter:

$$\alpha = \delta_{substrato} + 1000 / \delta_{produto} + 1000 \qquad (6.3)$$

Em situações de equilíbrio químico o fracionamento isotópico ocorre por efeito termodinâmico, como na troca gasosa na interface atmosfera-oceano. A mudança de temperatura altera o equilíbrio termodinâmico, mudando assim o fator de fracionamento (MARTINELLI *et al.*, 2009).

Em processos biológicos e físicos ocorrem ainda fracionamento isotópico por efeito cinético, associado à velocidade cinética das moléculas, de forma que a

transferência de massas, como a difusão de um gás, acontece de forma diferenciada entre os isótopos (MARTINELLI *et al.*, 2009).

Para uma amostra (P) composta por duas fontes (A e B), a contribuição relativa de cada uma destas pode ser calculada pelo modelo de mistura:

$$A = (\delta_P - \delta_B) / (\delta_A - \delta_B) \quad (6.5)$$

Tabela 05: Abundância isotópica de padrões utilizados para cálculos de δ.

Padrão	Elemento	R
PDB	Carbono	0,0112372
Atmosfera	Nitrogênio	0,0036765
V-SMOW	Oxigênio	0,00200052
V-SMOW	Deutério	0,00015576

Fonte: Martinelli *et al.* (2009).

6.3.1.1. Isótopos estáveis de carbono

Nos organismos fotossintetizantes a composição isotópica irá depender de três etapas: a difusão do CO_2 pelos estômatos (a ≈ 4,4 ‰); a fixação do CO_2 em composto orgânico (b ≈ 30 ‰); a diferença entre a pressão interna do dióxido de carbono na câmara estomatal e a pressão externa da atmosfera (P_i/P_a).

$$\delta\, ^{13}C_{planta} = \delta\, ^{13}CO_2 – a – (b – a)\, (P_i / P_a) \quad (6.6)$$

A equação 6.6 é normalmente válida para as plantas de ciclo fotossintético C3 – arbóreas – mas para aquelas do tipo fotossintético C4 – gramíneas – têm-se:

$$\delta\, ^{13}C_{planta} = \delta\, ^{13}CO_2 – a \quad (6.7)$$

Para as plantas C4 o termo relacionado à fixação do carbono na planta e a relação (P_i/P_a) podem ser desconsiderados (MEDINA *et al*, 1999 *apud* MARTINELLI *et a.l*, 2009).

Já para o fitoplâncton, Farquhar *et al* (1989, *apud* MARTINELLI *et al,* 2009) o modelo para obter a composição isotópica considera o δ ^{13}C dissolvido na água, a difusão do CO_2 na água (a_L≈ 0,7 ‰) e a fixação do CO_2 no organismo (b ≈ 30 ‰):

$$\delta\, ^{13}C_{fitoplâncton} = \delta\, ^{13}C_{dissolvido} - a_L – (b - a_L)\, (P_c / P_a) \quad (6.8)$$

Variando (P_c/P_a) de zero a um, obtêm-se uma variação da composição isotópica dos fitoplânctons entre -18 e -24‰.

Nakai (1972 *apud* Suguio, 2010) verificou boa correlação entre as curvas de $\delta^{13}C$ e teor total de carbono orgânico. Através de comparações com informações palinológicas constatou que os picos de ambas as curvas coincidem com os períodos mais quentes.

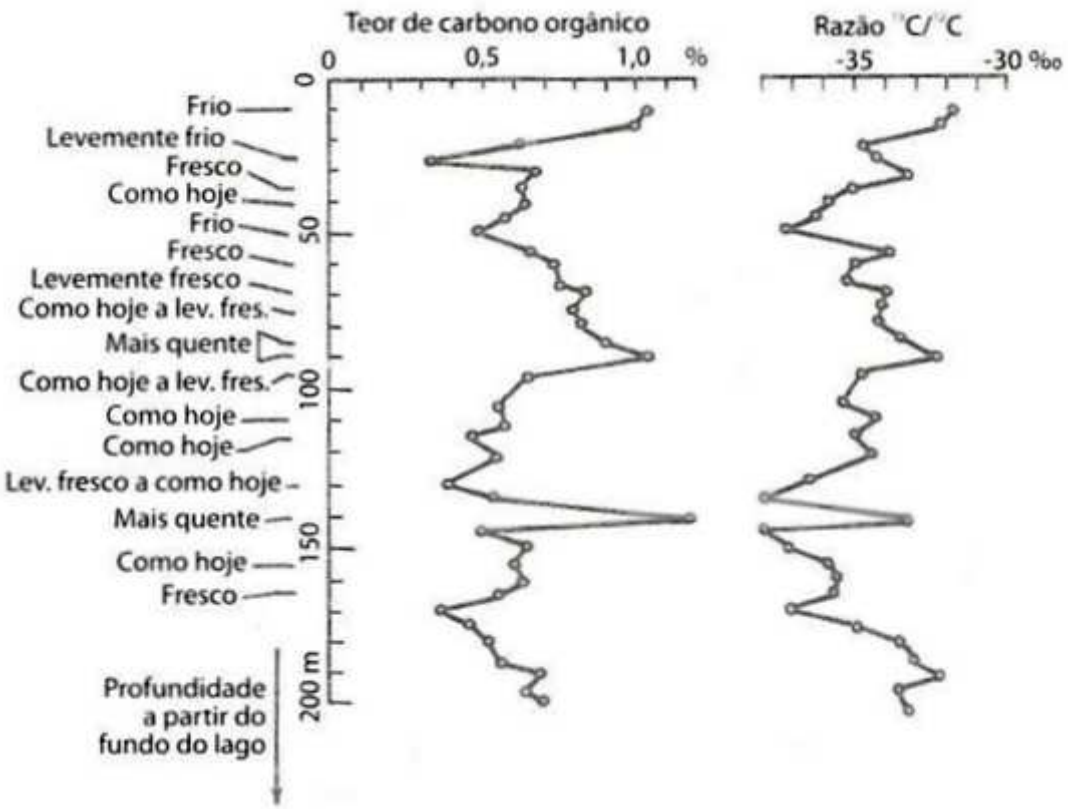


Figura 60: Correlação entre informações paleoclimáticas e teores de $\delta^{13}C$.
Fonte: Fuji (1974); Nakai (1972), *apud* Suguio (2010).

Geralmente os valores de $\delta^{13}C$ de plantas de florestas tropicais são mais negativos do que as de florestas temperadas. As espécies C3 apresentam valores de $\delta^{13}C$ inferiores – mais negativos – aos das plantas C4. Já os fitoplânctons apresentam $\delta^{13}C$ mais negativos aqueles de águas frias, onde há mais CO_2 dissolvido na água (MARTINELLI *et al*, 2009).

6.3.1.2. Isótopos estáveis de oxigênio

O padrão utilizado para obtenção de $\delta^{18}O$ é o VSMOW, o qual considera as águas combinadas de cinco oceanos, usando $R_{padrão}$ = 0‰ (MARTINELLI *et al*, 2009).

As mudanças de fase da água causam fracionamento isotópico em função da temperatura (T) em graus célcius, que pode ser expresso pelo fator de enriquecimento isotópico (ε):

$$\varepsilon = \delta^{18}O_{vapor} - \delta^{18}O_{chuva} \quad (6.9)$$

$$\varepsilon = 6{,}64 - (3210 / T) + (1530 / T^{-2}) \quad (6.10)$$

Pode-se ver que quanto maior a temperatura, menor o fracionamento isotópico entre as fases gasosa e líquida.

Em geral, devido às condições de não equilíbrio nas quais ocorrem a evaporação da água, a fase líquida costuma ficar isotopicamente mais pesada, ao passo em que a fase gasosa se torna mais leve (MARTINELLI *et al*, 2009).

Seres marinhos constituem carapaças de carbonato de cálcio utilizando íons de CO_3^{-2} diluídos na água, os quais trocam isótopos de oxigênio com as moléculas de H_2O. A proporção de ^{18}O no carbonato depende de uma constante K, a qual depende da temperatura da água (SUGUIO, 2010).

$$K = H_2{}^{16}O(C^{18}O_3{}^{-2})^{1/3} / H_2{}^{18}O(C^{16}O_3{}^{-2})^{1/3} \quad (6.11)$$

$$K = (C^{18}O_3{}^{-2} / C^{16}O_3{}^{-2})^{1/3} / (H_2{}^{18}O / H_2{}^{16}O) \quad (6.12)$$

O valor de K é inversamente proporcional à temperatura da água, variando entre aproximadamente 0,15‰ e 0,20‰ a cada 1°C de variação de temperatura, possibilitando assim o cálculo de paleotemperaturas da água (SUGUIO, 2010). Esse método também é utilizável em carbonatos precipitados inorganicamente, como no estudo de Neff *et al* (2001), o qual a partir do $\delta^{18}O$ de estalagmites em uma caverna no Omã demonstrou forte correlação entre variabilidade solar – obtida a partir de $\delta^{14}C$ – e as chuvas de monções no Holoceno Médio, conforme mencionado anteriormente.

Quando ocorre o fracionamento isotópico a partir da evaporação da água do mar, esta se torna isotopicamente mais pesada, ficando a precipitação sobre os continentes enriquecida em ^{16}O. A neve precipitada sobre os continentes retém o ^{16}O nas geleiras, as quais possuem maior volume nos períodos frios. Ao se testemunhar as geleiras o δO^{18} pode então ser utilizado para reconstrução paleoclimática.

6.3.2. Datação por isótopos radioativos

O fenômeno da desintegração radioativa é determinado pelo número e peso atômicos do elemento, de forma independente de temperatura e pressão, ocorrendo à velocidade constante (SUGUIO, 2010).

$$N = N_0 \, e^{-\lambda t} \quad (6.13)$$

Sendo:

N = número e átomos atual;

N_0 = número inicial de átomos;

λ = constante de desintegração radioativa;

t = tempo decorrido;

A ação dos raios cósmicos na atmosfera produz diversos radionuclídeos que podem ser usados para determinar a idade de uma amostra. Para que isso

ocorra é preciso conhecer a razão de produção desses radionuclídeos cosmogênicos, ou utilizando-os para um período não muito remoto, no qual a taxa de produção seja praticamente a mesma da atual; ou utilizando uma correção baseada na variação da entrada de raios cósmicos na atmosfera (SUGUIO, 2010).

O radiocarbono, produzido segundo a equação 6.35, combina-se com o oxigênio atmosférico formando dióxido de carbono que é absorvido pelos seres vivos. Com a morte desses organismos é interrompida a troca de carbono com o meio, permanecendo com o teor de ^{14}C da época de sua morte, cujo decaimento radioativo emite raios β. A intensidade de emissão desses permite medir o teor residual do ^{14}C e o a partir disso calcula-se o tempo decorrido a partir da morte do organismo (SUGUIO, 2010).

Uma forma de corrigir a taxa de produção pretérita de ^{14}C é através da comparação dos teores encontrados em anéis de crescimento de fósseis de árvores e as taxas atuais.

Para o cálculo da idade utilizando radiocarbono é usado o padrão de referência mundial do *National Bureau of Standards*, dos Estados Unidos, cuja radioatividade do CO_2 atmosférico é corrigida para o ano de 1950, ano anterior ao início dos ensaios termonucleares atmosféricos.

$$t = (T_{1/2} / 0{,}693) \ln [0{,}95 (N_p - N_b) / N_a - N_b] \quad (6.14)$$

Onde:

N_a = taxa média de contagem bruta da amostra;

N_p = taxa média de contagem bruta do padrão;

N_b = taxa média de contagem do ruído de fundo (CO_2 livre de radiocarbono);

$T_{1/2}$ = meia-vida do radiocarbono (5.730 anos).

Outros isótopos radioativos, como do urânio (U) e do tório (Th), costumam ser utilizados para datações absolutas, permitindo um alcance temporal maior, porém menos precisos do que o radiocarbono (SUGUIO, 2010).

6.4. Mudanças climáticas globais no tempo geológico

Muitos eventos registrados na história geológica terrestre são tipicamente cíclicos, sendo a imensa maioria deles caracterizados em uma escala temporal superior à vida humana média, que raramente ultrapassa os cem anos. O terremoto de Kobe, no Japão, em 1995, por exemplo, foi de uma intensidade a qual costuma se repetir apenas a cada mil anos. Mas as atividades sísmicas costumam ter ciclos de 50 a centenas de milhares de anos. A atividade

vulcânica, por sua vez, possui ciclos de 100 anos a um milhão de anos (SUGUIO; SUZUKI, 2010).

Para Rocha-Campos e Santos (2000), a alternância dos períodos de aquecimento e de resfriamento global ainda é tema controverso. Para esses autores, são quatro as categorias principais de causas de mudanças climáticas globais: variação na radiação solar que chega à Terra; variações na composição atmosférica; mudanças nas posições e extensões paleogeográficas dos continentes e dos oceanos; causas extra-terrestres.

Na medida em que os registros geológicos se tornam mais antigos, menos evidências sobre o passado podem ser recuperadas. Contudo, a resolução das reconstituições paleoecológicas melhora significativamente com a maior quantidade e melhor qualidade das informações obtidas a partir de registros mais recentes.

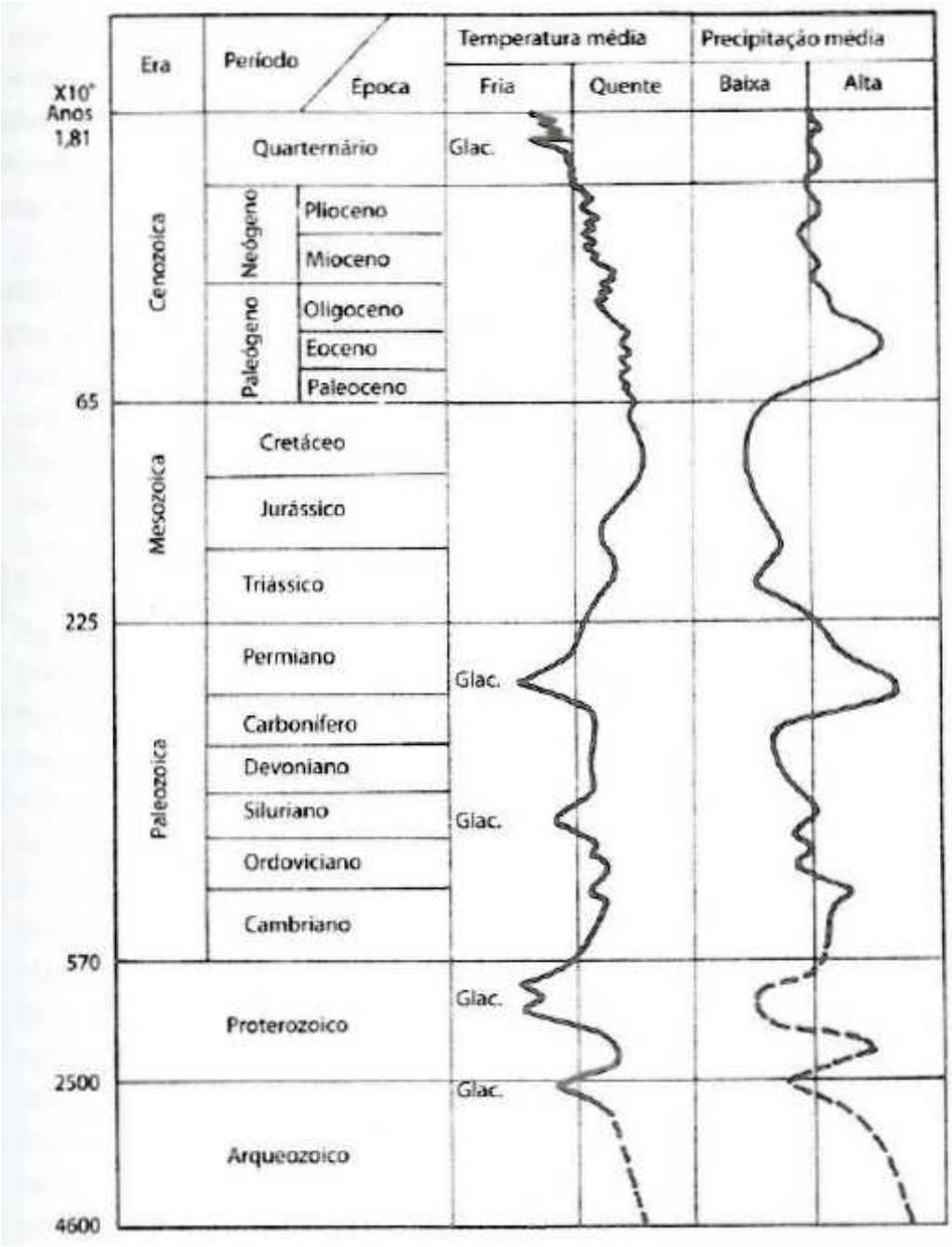


Figura 61: Curvas de temperatura e precipitação médias da Terra em relação às condições atuais. Tempo em milhões de anos.
Fonte: Frakes (1979) *apud* Suguio (2010).

Quando a grande Idade do Gelo foi descoberta na primeira metade do século XIX, imaginava-se que uma vez uma imensa geleira teria coberto toda a Europa, de forma que todos os sedimentos de transporte glacial espalhados pela Europa tivessem a mesma idade. Contudo, mais tarde, os estudos estratigráficos revelaram que entre as camadas de sedimentos glaciais havia camadas de turfa, evidenciando o recuo das geleiras, caracterizando os estádios interglaciais. Assim, descobriu-se que a Era do Gelo foi composta por estádios glaciais e interestadiais. E os estádios glaciais, por sua vez, eram intercalados por períodos mais breves de melhoria climática que não chegavam

a recuperar plenamente a vegetação, evidenciando recuos regionais das geleiras, o que dificulta a correlação desses eventos em escala global (SUGUIO, 2010).

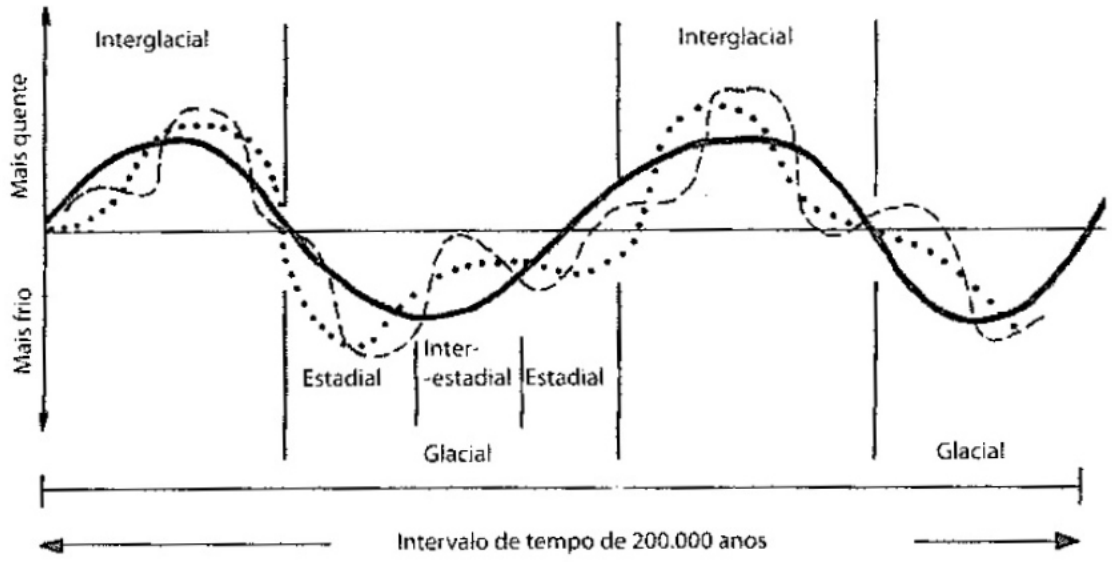


Figura 62: Flutuações climáticas entre estádios glaciais e interglaciais.
Fonte: Lowe e Walker (1997) *apud* Suguio (2010).

As idades do gelo não são, contudo, exclusividades do período Quaternário, tendo ocorrido glaciações continentais em diversos períodos, como no Proterozóico Superior, quando todos os continentes com exceção da Antártica estiveram congelados (Hambrey; Harland, *apud* Suguio, 2010).

Para Suguio (2010) não é possível apontar causa única para qualquer variação paleoclimática, uma vez que essas variações são resultado da complexa interação entre fenômenos astronômicos, geofísicos e geológicos, como a atividade solar, os ciclos de Milankovitch e mudanças na composição atmosférica terrestre.

As pesquisas relacionadas às mudanças globais vêm obtendo resoluções temporais cada vez melhores, permitindo analisar eventos da escala de milhões de anos até a escala de décadas. Essa sequência temporal deve ser obtida em escalas temporais comparáveis entre si, permitindo a detecção das magnitudes, amplitudes e épocas da variação, de forma a revelar informações que possam subsidiar climatologistas a entenderem os mecanismos e fatores controladores dos climas das diferentes épocas (SUGUIO, 2010).

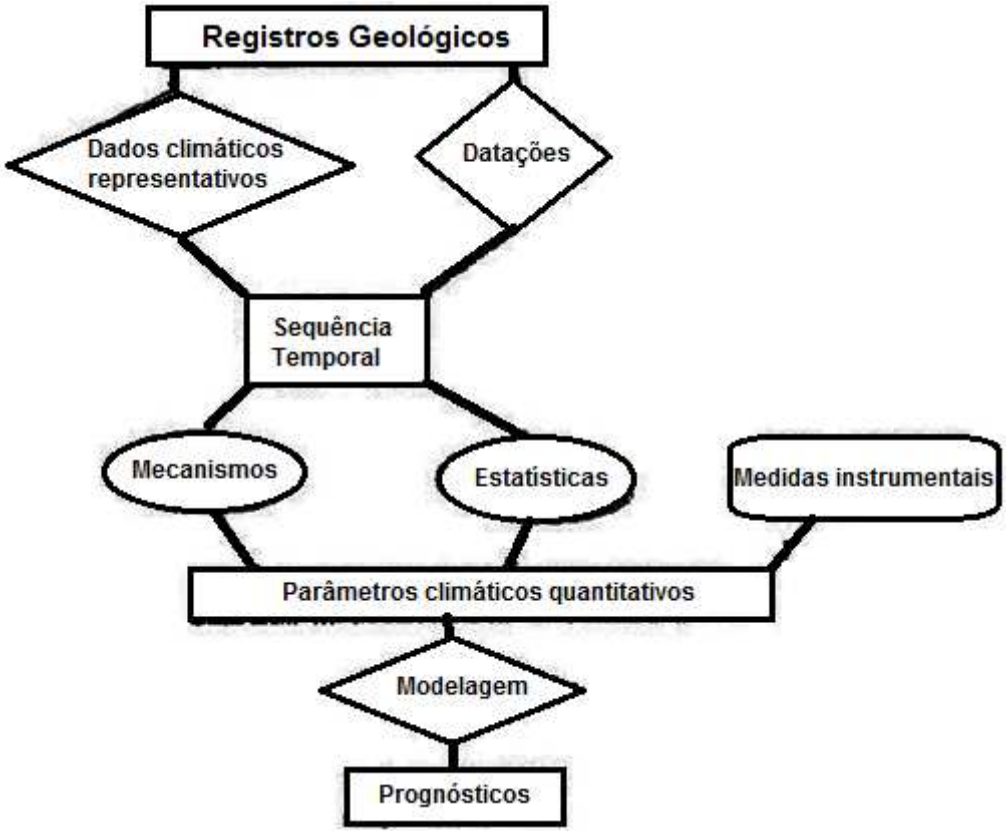


Figura 63: Sequência metodológica para estudos paleoclimáticos.
Fonte: Suguio (2010).

As diferentes escalas temporais e espaciais de análise, portanto, não podem ser comparadas entre si de forma irrestrita. Suguio (2010) cita os estudos de Davis (1986), que apresentou a variação de temperaturas do hemisfério norte em diferentes escalas temporais. Alguns eventos paleoclimáticos podem ter magnitude menos significativa quando representados em um intervalo temporal mais amplo, que represente também outros eventos. Algumas mudanças paleoclimáticas na verdade estão inseridas dentro de mudanças maiores, em escalas de tempo mais extensas.

Na escala do último milênio, a Pequena Idade do Gelo se mostra como um evento bastante significativo. Na escala dos últimos 10 mil anos, englobando a Idade Hipsitérmica – o ótimo climático do Holoceno – a Pequena Idade do Gelo ainda pode ser percebida. Contudo, em escalas temporais mais amplas, dentro de um padrão de ciclos mais significativos, a Pequena Idade do Gelo não pode ser identificada nos gráficos.

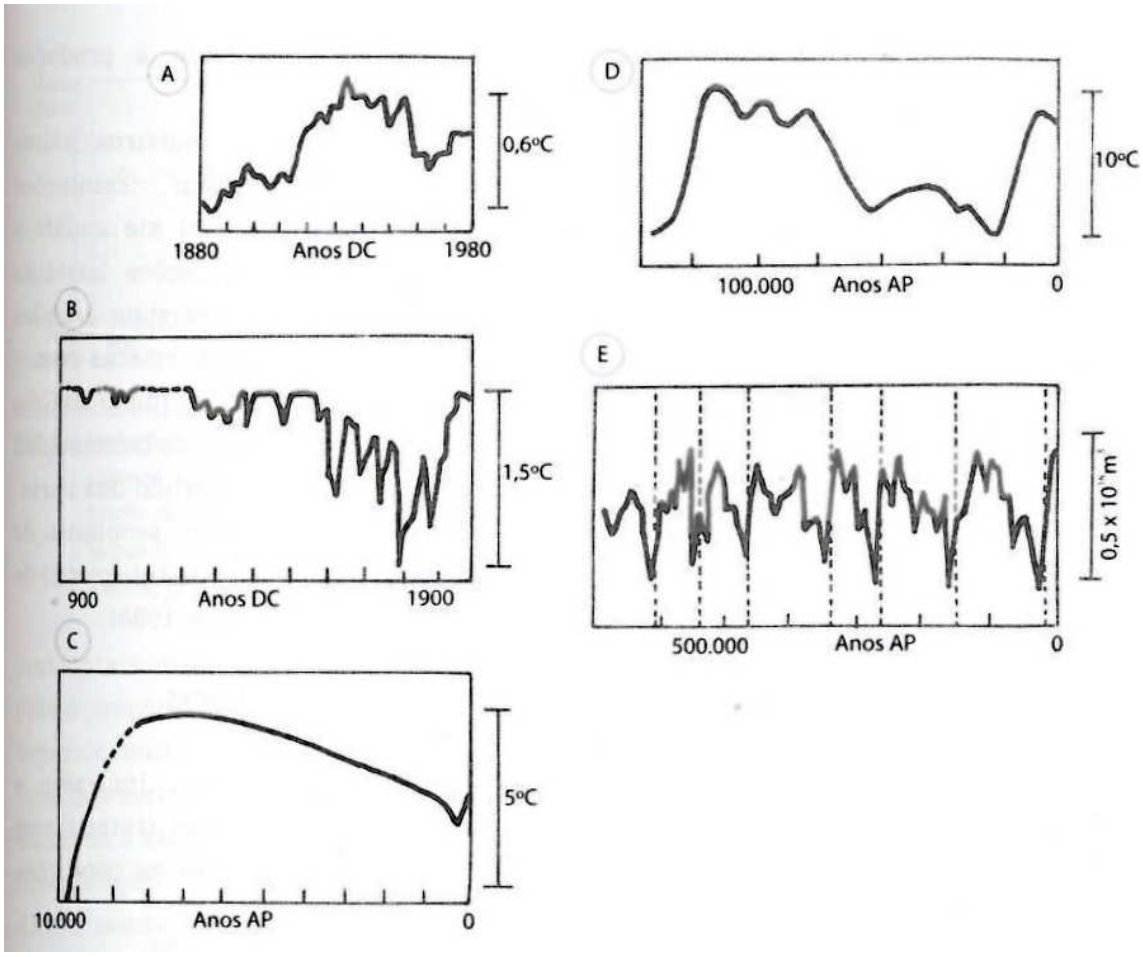


Figura 64: Paleotemperaturas do hemisfério norte.
Fonte: Davis (1986) *apud* Suguio (2010).

Alguns fenômenos naturais acabam por registrar as condições do acontecimento. Esses registros, em geral, podem fornecer diversos tipos de informações: temperatura, umidade, precipitação, composições químicas do ar, da água ou do solo, biomassa, variações do campo geomagnético, nível do mar, dentre outros. Para que esses registros forneçam informações com grande precisão é necessário lançar mão de métodos adequados de determinação das idades dos acontecimentos, sendo assim, a datação, uma questão essencial. Contudo, com as diferentes incertezas envolvidas, a pesquisa paleoecológica deve se apoiar na convergência das evidências, aproximando ao máximo as informações obtidas da realidade dos fatos ocorridos (SUGUIO, 2010).

Com os recentes estudos a partir dos testemunhos de gelo, cientistas encontraram evidências de que os teores atmosféricos de CO_2 e CH_4 parecem ter sido menores do que os atuais durante a última glaciação. Analogamente, a quantidade de aerossol atmosférico parece ter sido superior à atual. Essas pesquisas têm levantado questões como: O que teria causado tais variações? Existe algum limite crítico a partir do qual o Sistema Terra seria conduzido a um

novo estado de estabilidade? Apenas com dados paleoambientais cada vez mais precisos tais perguntas poderão ser respondidas (SUGUIO, 2010).

6.4.1. Quaternário: um período de glaciações

O geólogo C. Lyell (1797-1875), por ocasião de propor uma visão geológica independente da até então predominante escola *netunista* – a qual tentava conciliar as observações de campo com a mitologia bíblica e tomava o evento do dilúvio como explicação para a conformação atual das rochas e do relevo – denominou de período Recente aquele subsequente ao Terciário, no qual o homem passou a habitar amplamente a Terra (SUGUIO, 2010).

Mais tarde, Lyell propôs o emprego do período Pleistoceno enquanto parte final do Terciário, no qual já existiam 70% das formas de vida atuais. Já o denominado período Recente foi mais tarde substituído pelo termo Holoceno, durante o 3° Congresso Geológico Internacional, sendo que ainda hoje o termo Recente ainda é bastante utilizado como sinônimo de Holoceno (SUGUIO, 2010).

O termo Idade do Gelo foi proposto em 1837 por L. Agassiz (1807-1873), um discípulo de G. Cuvier, que mais tarde escreveu o livro *Estudo das Geleiras*, no qual relacionava as dinâmicas das atuais geleiras com evidências de geleiras do passado. O próprio J. Hutton e outros cientistas já associavam ao transporte glacial a presença de grandes blocos erráticos de procedência desconhecida por todo o norte da Europa, lançando a ideia de que grande parte do continente estivera sob gelo em tempos não muito remotos (SUGUIO, 2010).

O Quaternário, composto pelas épocas Pleistoceno e Holoceno, foi objeto de muita discussão, principalmente quanto ao seu limite inferior, caracterizando o fim do Plioceno como o início dos paleoclimas glaciais. O limite Plioceno-Pleistoceeno é estabelecido em 1,8 Ma A.P., enquanto o limite Pleistoceno-Holoceno foi estabelecido como 10.000 A.P.

Atualmente, a Comissão Internacional de Estratigrafia (ICS) da União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS) propõe a exclusão do termo Quaternário, assim como ocorreu com os termos primário, secundário e terciário, contudo, a Associação Internacional para Pesquisa do Quaternário (INQUA) propõe a formalização do termo, diante de seu já tão intensivo uso. Além disso, sugerem também o estabelecimento do início do Quaternário há 2,6 Ma, uma vez que evidências apontam o início de uma série de ciclos glaciais de intensidade crescente nesse interstício, além de corresponder à transição das forçantes paleoclimáticas dominadas pela precessão dos equinócios para aquelas dominadas pela obliquidade da eclítica, segundo a teoria de Milankovitch. Já Kenitiro Sugio, em seu livro *Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais,* propõe o abandono do termo Quaternário, utilizando-o enquanto unidade cronoestratigráfica informal, tal qual o Pré-Cambriano.

Tabela 06: Proposta da Comissão Internacional de Estratigrafia da União Internacional de Ciências Geológicas.

Eon	Era	Período	Época	Final (Ma A.P.)
Fanerozóico	Cenozóico	Holoceno		Atual
		Neógeno	Pleistoceno	0,0115
			Plioceno	1,806
			Mioceno	6,332
		Paleógeno	Oligoceno	23,03
			Eoceno	33,9±0,1
			Paleoceno	55,8±0,2

Fonte: Adaptado de Gradstein *et al* (2004) *apud* Suguio (2010).

Tabela 07: Proposta Proposta de Kenitiro Suguio.

Período	Época	Estágio	Final (Ma A.P.)	
Neógeno	Pleistoceno	Superior	Atual	Quaternário
		Médio	0,126	
		Inferior	0,781	
	Plioceno	Gelasiano	1,806	
		Piacenziano	2,588	
		Zancliano	3,600	

Fonte: Suguio (2010).

Com relação ao Holoceno, época comumente designada como pós-glacial, Suguio (2010) questiona o emprego do termo, uma vez que não existem provas de que as glaciações iniciadas no Plioceno tenham se encerrado. Sendo o Holoceno apenas um estádio interglacial pleistocênico, não teria significância enquanto época do período Neógeno

Como a natureza possui processos que atuam em diferentes escalas espaciais e temporais, muitas mudanças não são testemunhadas no tempo de vida humano, havendo então necessidade de recorrer a métodos de precisão. Os métodos cronológicos utilizados para correlações mundiais quaternárias utilizam paleomagnetismo, variação da razão $^{18}O/^{16}O$ e radiocronologias diversas, como aquela por carbono (SUGUIO, 2010).

6.4.2. Holoceno: aquecimento ou resfriamento

Considerando-se o Holoceno um estádio interglacial iniciado há cerca de 10.000 anos, em caso de perpetuação da frequência dos atuais ciclos glacial-interglacial e de variação da órbita terrestre, poder-se-ia esperar em um futuro breve o início de um novo estádio glacial, como aponta Luís Carlos Baldicero Molion em suas diversas entrevistas ao programa Canal Livre e em diversas palestras e artigos.

Imbrie e Imbrie (1979 *apud* SUGUIO, 2010) apontam que, mesmo havendo um aquecimento global causado pela liberação de CO_2 antropogênico, a Terra entraria em um novo estádio glacial, mas este poderia ser então atrasado em até 2.000 anos.

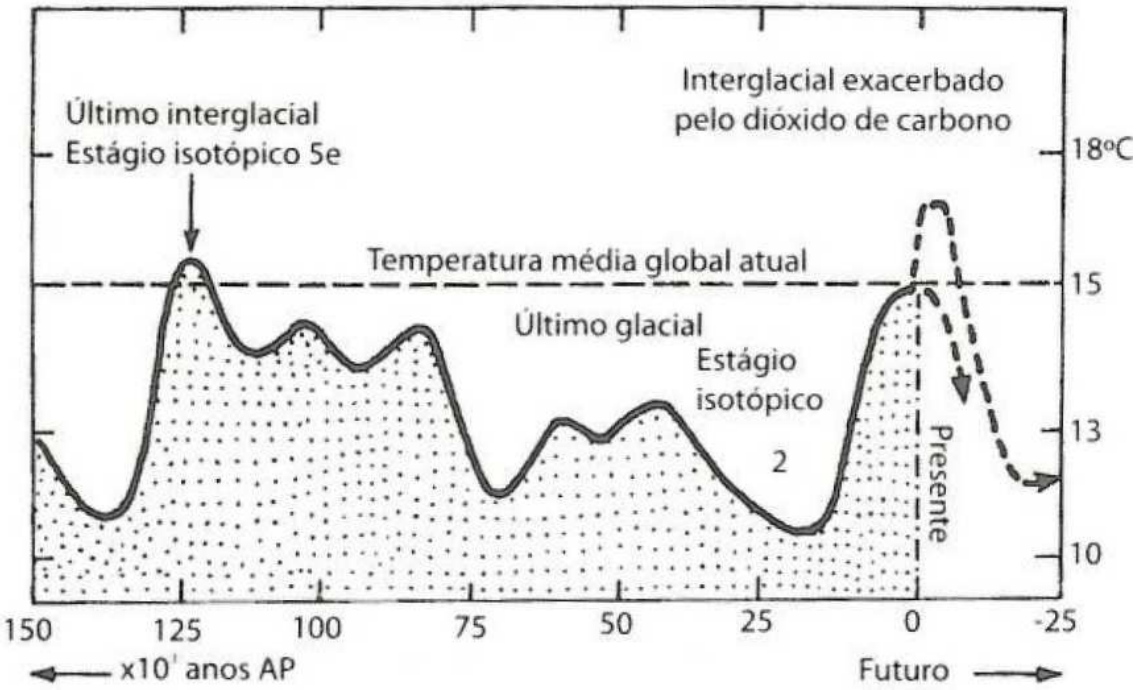


Figura 65: Prognóstico climático para os próximos 25 mil anos. A linha tracejada representa o prognóstico caso se confirme a hipótese de aquecimento causado pela queima de combustíveis fósseis.
Fonte: Imbrie e Imbrie (1979) *apud* Suguio (2010).

6.4.3. Pesquisas paleoecológicas da era Cenozóica

Diversos pesquisadores atualmente se dedicam à reconstituição de paleoambientes, munidos com as modernas técnicas de datação. Revistas científicas de importância internacional como a *Nature* e a *Science* recorrentemente publicam artigos sobre o tema.

6.4.3.1. Declínio do dióxido de carbono atmosférico durante o Paleógeno

O início do Eoceno (entre 55 e 52 milhões de anos atrás) foi o período mais quente dos últimos 65 milhões de anos na Terra, havendo ausência de gelo mesmo em altas latitudes. A transição climática entre o Eoceno e o Oligoceno é associada à rápida expansão de placas de gelo continentais na Antártica, sendo condição fundamental para a condição de “casa de gelo” durante o Cenozóico (PAGANI *et al*, 2005).

Um estudo de Mark Pagani, James C. Zachos, Katherine H. Freeman, Brett Tipple e Stephen Bohaty, publicado na *Science* em 2005 identificou a queda da concentração de dióxido de carbono atmosférico no fim do Paleógeno.

Para tanto, utilizaram dados do *Deep Sea Driling Project* e do *Ocean Driling Program*, a partir dos quais foram obtidas informações sobre a composição isotópica de carbono (^{13}C) dos sedimentos, as quais permitiram o cálculo da concentração de CO_2 atmosférico. Esses dados foram então comparados com dados de isótopos de oxigênio obtidos a partir de foraminíferos bênticos, os quais refletem a paleotemperatura do período.

Durante o Eoceno as concentrações de CO_2 flutuaram entre 1000 e 1500 ppmv[4] e depois caíram durante o Oligoceno, até atingir níveis semelhantes aos atuais, acompanhando a expansão das placas de gelo na Antártica. Um episódio de alto pCO_2[5] no final do Oligoceno ocorrido junto a uma queda de $\delta^{18}O$ na composição da fauna foraminífera bêntica indica que havia na época uma relação entre pCO_2 e o clima global.

Contudo, durante o Mioceno, a pCO_2 variou de forma pouco significativa enquanto a Terra atravessou períodos de aquecimento e resfriamento, ficando pouco evidente a associação do ciclo do carbono com o clima.

Dessa forma, a partir das observações de Salgado-Laboriau (1994) e de Camargo (2005), pode-se concluir que a entre os períodos Paleógeno e Neógeno houve uma mudança ecológica global, na qual as relações entre os elementos do sistema foram alteradas. Assim, a relação de retroalimentação entre a temperatura e a concentração de dióxido de carbono ocorre de forma diferente entre os dois períodos, impossibilitando que os dados de um sejam usados em modelagens para o outro.

---

[4] Parte por milhão volumétrica.

[5] A pressão parcial de um gás é aquela a componente da pressão total em um determinado volume correspondente apenas às moléculas daquele gás. Quando a pressão parcial de dióxido de carbono (pCO_2) no oceano supera àquela na atmosfera há a liberação do gás para esta. Já quando a pCO_2 atmosférica é maior, há absorção do gás pelas águas do mar.

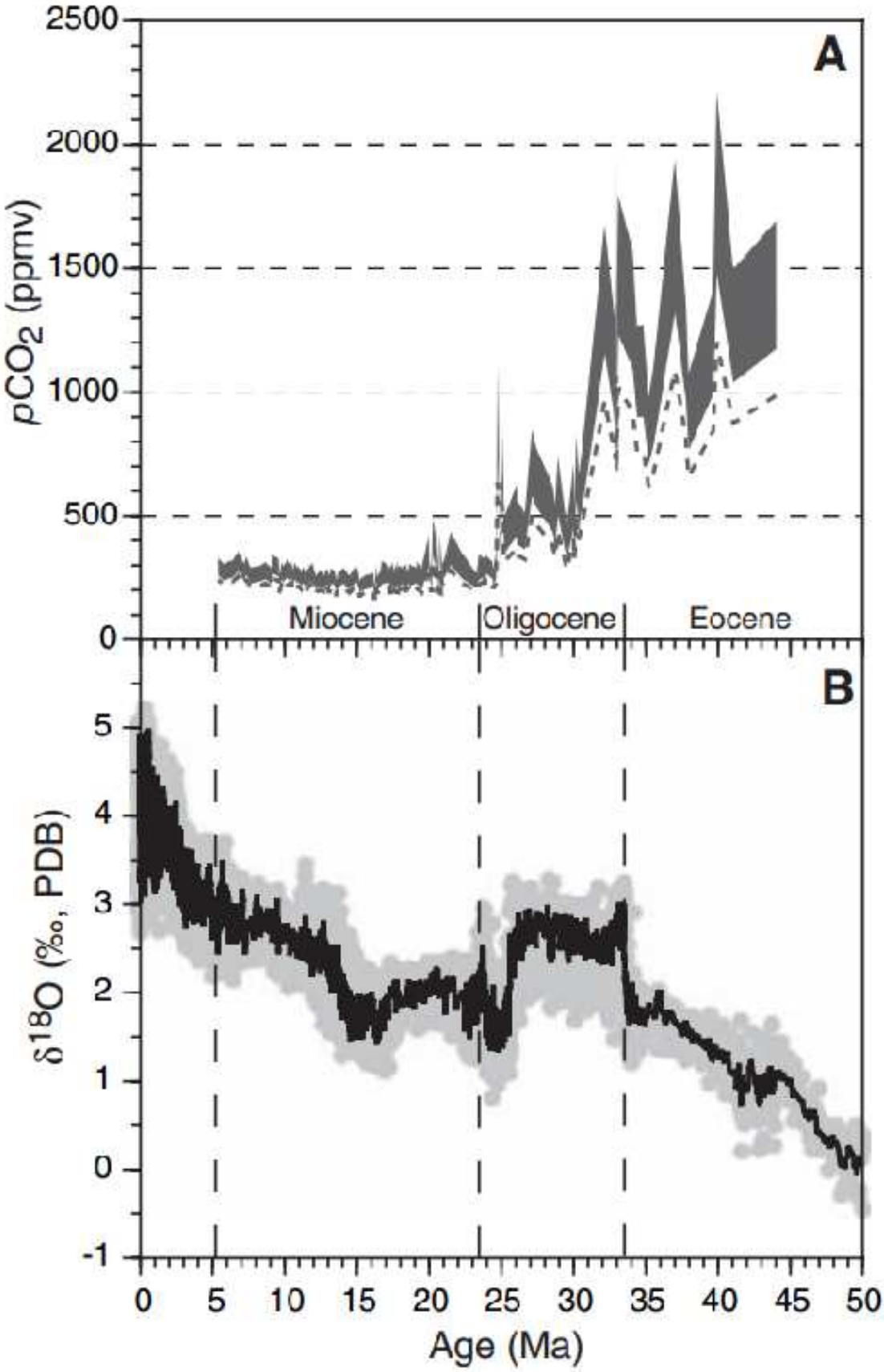


Figura 66: Comparação entre as curvas de pCO2 e de δ18O.
Fonte: Pagani *et al* (2005).

6.4.3.2. Forçante do dióxido de carbono é insuficiente como explicação única para o aquecimento do Máximo Termal Paleoceno-Eoceno

Durante o Máximo Termal Paleoceno-Eoceno (MTPO) houve uma liberação de CO_2 na atmosfera em magnitude similar à de origem antrópica nos últimos anos. Nesse período as temperaturas médias da superfície terrestre subiram entre 5° e 9°C em poucos milhares de anos. Alguns cientistas especulam que a origem da liberação foram erupções vulcânicas e que o mecanismo causou o aquecimento, enquanto outros acreditam que o carbono foi liberado a partir da desestabilização de hidratos de carbono oceânicos como um mecanismo de resposta que inclusive pode ter amplificado o aquecimento (ZEEBE *et al,* 2009).

Richard E. Zeebe, James C. Zachos e Gerald R. Dickens, publicaram na *Nature Geoscience,* em 2009, uma pesquisa que procurou identificar as relações entre a concentração atmosférica de dióxido de carbono e o período de aquecimento global ocorrido no período Paleógeno, uma vez que pesquisas recentes haviam descoberto que a concentração de dióxido de carbono para a atmosfera na época foram de magnitude semelhante à atual.

Com a diminuição da razão $^{13}C/^{12}C$ causada pela liberação dióxido de carbono na atmosfera levou à acidificação oceânica e consequente ampla dissolução de carbonato nos oceanos. A Profundidade de Concentração da Calcita (PCC) era menor nos períodos de maior aporte de CO_2 na atmosfera, o que levava à maior precipitação de carbonato de cálcio. A partir de dados de $CaCO_3$ de sedimentos marinhos, pôde-se reconstruir a concentração atmosférica de CO_2 à época.

Considerando o modelo climático utilizado pelo IPCC, no qual a temperatura se eleva entre 1,5° e 4,5°C a cada vez que a concentração de CO2 atmosférico é dobrada, partindo de um fator de aumento de 1,7 para o Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno, a temperatura na época deveria ter se elevado em no máximo 3,5°C, segundo o cenário de maior sensibilidade climática.

Como já era conhecido que as temperaturas naquele período se elevaram entre 5° e 9°C, então fica evidente que a forçante climática do dióxido de carbono não pode ter sido a única responsável por tal aumento de temperatura.

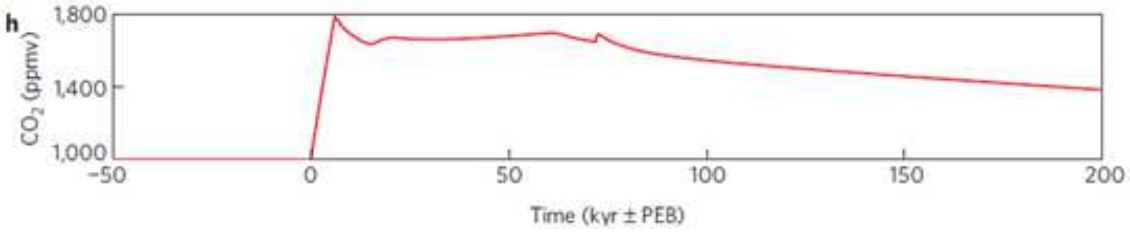


Figura 67: Concentração de CO_2 atmosférico no limite Paleoceno-Eoceno.
Fonte: Zeebe *et al* (2009).

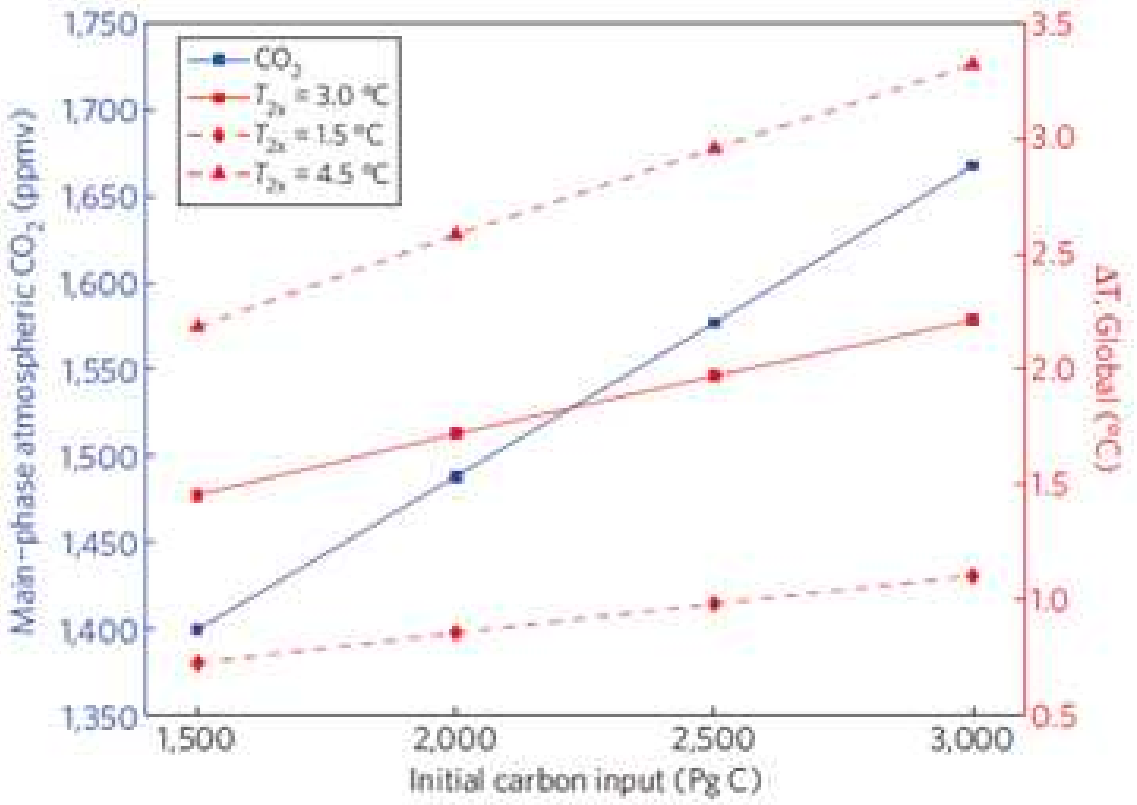


Figura 68: Temperaturas globais calculadas com diferentes sensibilidades climáticas (linhas vermelhas) e a concentração atmosférica de dióxido de carbono em função da entrada inicial de 1000ppmv anterior ao Máximo Termal Paleoceno-Eoceno.
Fonte: Zeebe *et al* (2009).

6.4.3.3. Ligação entre dióxido de carbono e estabilidade das placas de gelo durante as maiores transições climáticas dos últimos 20 milhões de anos

Durante os últimos 20 milhões de anos houve mudanças significativas de nível médio dos mares devido à expansão e à retração das placas de gelo continentais, como o crescimento da placa de gelo da Antártica e a formação da calota do ártico durante o Mioceno Médio (14 a 10 milhões de anos) e a intensa glaciação do hemisfério norte no Plioceno Superior (3,4 a 2,4 milhões de anos). Essas flutuações podem ter sido causadas por mudanças na circulação oceânica durante a deriva continental, mudanças na concentração de dióxido de carbono da atmosfera e variações na órbita da Terra (TRIPATI *et al*, 2009).

Apesar da grande especulação acerca do papel do ciclo do carbono nessas mudanças climáticas, há poucas evidências relacionando o pCO_2 aos dados climáticos obtidos nos testemunhos de gelo. A pressão parcial do dióxido de carbono na fase gasosa (pCO_2) é aumentada em ambientes com pH ácido e diminuída em pH alcalino.

Procurando encontrar evidências que relacionem o dióxido de carbono ao clima, Aradhna K. Tripati, Christopher D. Roberts e Robert A. Eagle publicaram na *Science*, em 2009, um artigo intitulado "*Coupling of CO2 and Ice Sheet Stability Over Major Climate Transitions of the Last 20 Million Years*".

Partindo da hipótese de que o dióxido de carbono e o clima possuem forte ligação durante esses eventos de transição climática, foram calculados o pCO_2 e o pH de águas superficiais durante três intervalos específicos (20 a 5 Ma; 3,5 a 2,4 Ma; 1,4 Ma até o presente) utilizando razões B/Ca de foraminíferos[6].

Entre os resultados encontrados por eles, concluíram que no período entre 20 e 15 Ma A.P. houve um período de aquecimento global, com pouca evidência de gelo na Antártica e na Groenlândia.

Durante o Ótimo Climático do Meio Mioceno (OCMM) – entre 16 e 14 milhões de anos – quando os dados apontam para um nível de pCO_2 superior aos 387ppmv registrados em 2009, as evidências apontam para nível relativo do mar até 40m mais alto do que o atual, temperaturas mais quentes em superfície e em águas profundas e presença reduzida de gelo. Após o OCMM, durante o resto do Mioceno, o pH marinho permaneceu relativamente alto e o pCO2 estável em torno de 200ppmv, o que reflete os dados de $\delta^{18}O$ provenientes dos testemunhos de gelo e coincide com o aumento do gelo em ambos os hemisférios.

O Mioceno tardio (10 a 7 Ma A.P.) foi caracterizado por pH oceânico alto, com pCO_2 baixo e alguma expansão de placas de gelo na Antártica e na América do Norte. Já entre 7 e 5 Ma A.P. apresentou amplas variações de pCO2 que refletem a característica de interstícios interglaciais conhecida no período.

Já durante o Plioceno tardio (entre 3,4 e 2,4 Ma A.P.) houve aumento do pH, decréscimo de pCO_2 e intensificação das glaciações. Para os autores, as correlações de pCO_2, pH, razão borato-bicarbonato e as temperaturas estimadas a partir de $\delta^{18}O$ dos testemunhos de gelo (últimos 800 mil anos) são bastante fortes e embasam a teoria de que o dióxido de carbono está significativamente ligado às mudanças climáticas.

Ressalta-se o fato de que as conclusões de Pagani *et al* (2005) divergem das desse estudo, pois para os primeiros autores, não há relação significativa entre o dióxido de carbono e a temperatura global a partir do Mioceno. Já Tripati *et al* (2009), realizando comparações apenas dentro do período Neógeno, concluem haver correlação evidente.

---

[6] A razão B/Ca de foraminíferos planctônicos pode ser usada para estimar as razões de borato e bicarbonato da água marinha. A razão $[B(OH)_4^-/HCO_3^-]$ responde às mudanças no sistema carbonático (pH, carbono orgânico dissolvido) assim como à concentração total de boro (YU *et al,* 2007, *apud* TRIPATI *et al*, 2009).

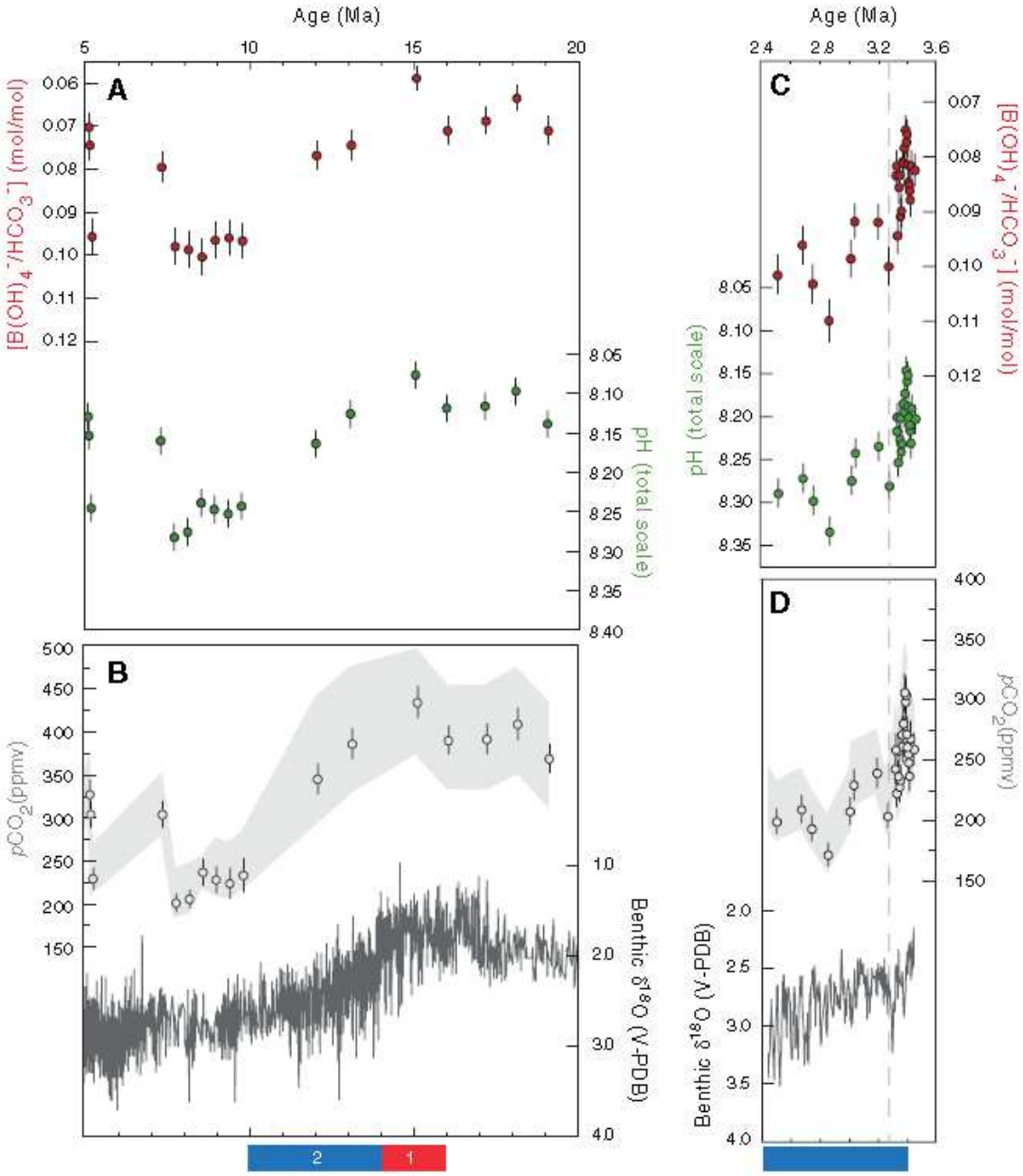


Figura 69: Comparação de pCO2, pH e razão borato-bicarbonato para o Mioceno e para o Plioceno tardio.
Fonte: Tripati *et al* (2009).

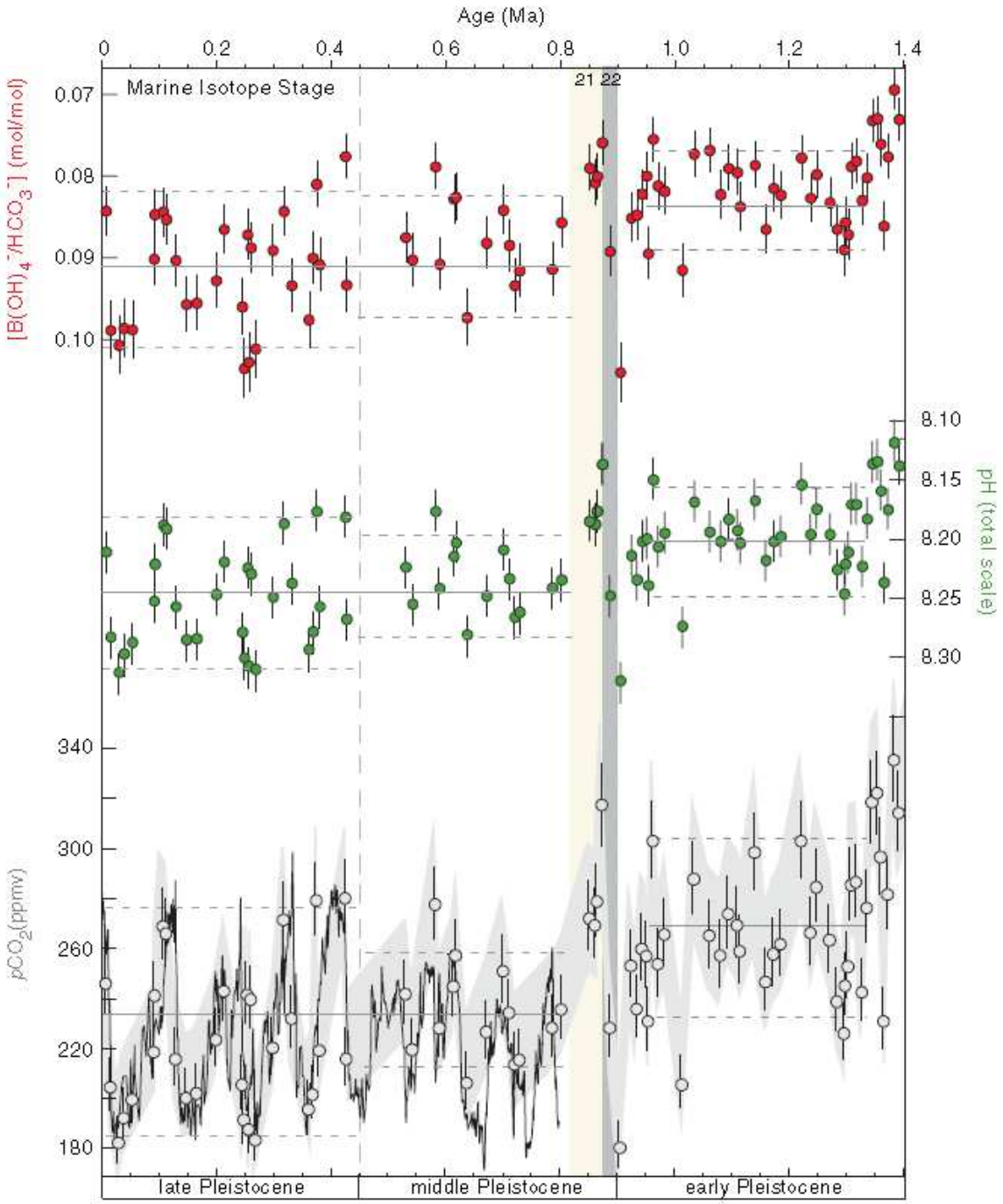


Figura 70: Comparação de pCO2, pH e razão borato-bicarbonato para o Pleistoceno.
Fonte: Tripati *et al* (2009).

7. A HIPÓTESE DO AQUECIMENTO GLOBAL ANTROPOGÊNICO

Entre 23 e 26 de setembro de 2013 ocorrerá, em Estocolmo, Suécia, a XII Sessão do Grupo de Trabalho I do IPCC - Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas – se reunirão para aprovar os resumos do *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Esse livro é a contribuição do grupo de trabalho I para o 5° Relatório de Avaliação do IPCC.

Os relatórios de Avaliação do IPCC são os principais documentos de referência para os cientistas que defendem a hipótese do aquecimento global antropogênico. Mas, devido ao grande número de páginas, carregadas de linguagem científica inacessível ao público leigo, é através de seus resumos, principalmente o Resumo para Políticos, é que o IPCC divulga suas concepções, estimativas e sugestões de políticas.

Para Onça (2007, p.120):

> *Um efeito colateral dessa medida é o de que, se os relatórios já tendem a mascarar as incertezas quanto à hipótese do aquecimento global e a forjar um consenso, nos resumos essa tendência é altamente marcante ao longo de toda a discussão, dissipando qualquer tipo de dúvida. É claro que são esses resumos, e não os relatórios em si, que são lidos – se é que são! – e depois ainda mais condensados pela mídia, para divulgação para o grande público. Definitivamente, não sobra qualquer resquício de dúvida ou dissenso: o aquecimento global existe, é causado pelo homem e suas consequências, já sentidas, serão desastrosas.*

A figura 71 mostra que no *Climate Change 2001: The Physical Science Basis,* o IPCC já considerava como amplamente conhecida a forçante climática dos gases de efeito estufa emitidos por atividades antrópicas. Não obstante a controvérsia dessa suposição, faz-se notável o fato da figura não abordar o vapor d'água – o gás de efeito estufa mais abundante na atmosfera – nem mesmo enquanto forçante pouco conhecida.

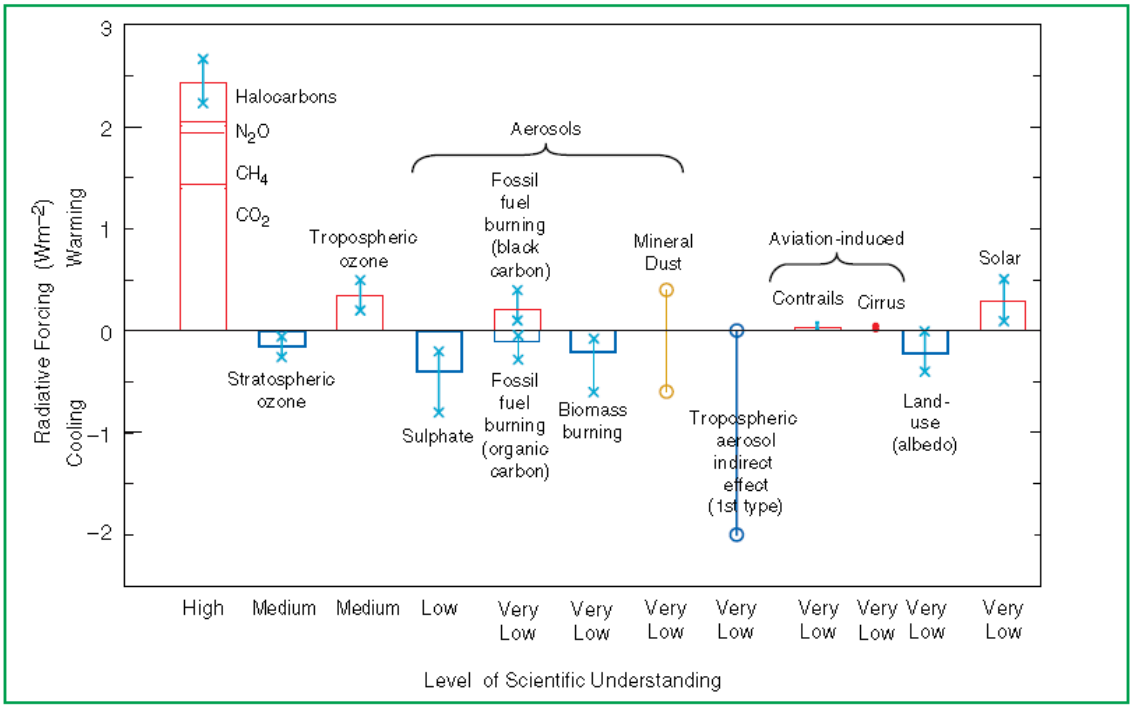


Figura 71: Médias anuais globais de forçantes radiativas (Wm^{-2}) do período pré-industrial (1750) até o presente (fim da década de 1990). A altura da barra retangular um valor estimado. A linha vertical marcada com um "x" nas extremidades indica a incerteza da estimativa a partir de dados publicados. A linha vertical com um "o" nas extremidades indica uma forçante cuja estimativa central não pode ser estimada devido às grandes incertezas envolvidas. Um índice de "entendimento científico" mostra um julgamento subjetivo acerca da confiabilidade das estimativas sobre as forçantes, baseado nas premissas necessárias para calculá-las, no grau de conhecimento dos mecanismos físicos e químicos que as determinam e nas incertezas inerentes às estimativas quantitativas.
Fonte: IPCC (2001).

No *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, o IPCC afirma que o fator dominante na forçante radiativa do clima na era industrial são os gases de efeito estufa. Tal afirmação contraria as hipóteses que consideram outras forçantes como mais significativas do que a da composição atmosférica e contraria também as hipóteses de que o vapor d'água seja o gás de efeito estufa mais efetivo e mais abundante.

Ainda no mesmo livro, o IPCC afirma que, com 28 anos de medições de satélite da irradiância solar, foi detectada uma variação de apenas 0,08% na mesma dentro do ciclo de 11 anos, sem nenhuma tendência de longo prazo significante. Essa afirmação claramente desconsidera todas as forçantes astronômicas e cósmicas, resumindo a forçante solar à variação na irradiância total.

O IPCC (2007) afirma ainda que a hipótese de influência dos raios cósmicos no clima não possui fundamentação física satisfatória e que as séries temporais de raios cósmicos não apresenta correlação significativa com a nebulosidade global a partir de 1991, o que, para eles, tornaria a associação entre raios cósmicos e formação de nuvens controversa. Essa afirmação contraria as

teorias de Shaviv, Svensmark e toda a equipe do Centro Espacial Nacional Dinamarquês e Kirkby e toda a equipe do experimento CLOUD, apresentadas anteriormente.

Contudo, para as variações climáticas anteriores à era pré-industrial, o IPCC reconhece as diversas outras forçantes, principalmente externas, como causadoras de mudanças climáticas. Para o IPCC (2007) é muito provável que as mudanças climáticas em há pelo menos sete séculos anteriores a 1950 foram causadas por forçantes naturais, como vulcanismo e tendências de longo prazo de variação da irradiância solar. Mas para eles, essas forçantes não seriam as principais causas das mudanças climáticas pretéritas. Nas glaciações, por exemplo, forçantes como os Ciclos de Milankovicth poderiam apenas ter iniciado um resfriamento, gerando então um efeito de *feedback* positivo no dióxido de carbono, o qual amplificaria o resfriamento inicial levando a uma glaciação.

Torna-se claro que o IPCC entende a variabilidade climática do planeta, a complexidade do sistema de fenômenos que operam simultaneamente e que interferem uns nos outros, mas que, ainda assim, fazem um esforço para afirmar que, a partir da era industrial, toda a mudança climática percebida tem origem única e indubitavelmente antrópica.

7.1. A mídia e o aquecimento global

Notícias sobre o clima se tornaram moda na mídia em geral nos últimos anos. Jornais, noticiários televisivos, revistas semanais, programas de rádio, *talk shows*, entre tantos outros divulgam “descobertas científicas” – sem sequer citar as fontes, na maioria das vezes – ou trazem ilustres entrevistados, os quais são induzidos a falar de forma imprecisa ou inconclusiva por entrevistadores apressados, pouco competentes ou mesmo manipuladores.

Perguntas tendenciosas ou simplesmente mal formuladas podem ser vistas, por exemplo, na entrevista de Ricardo Augusto Felício no Programa do Jô, em 02 de maio de 2012, onde o questionamento da visão aparentemente hegemônica é tratado com certo desdém. Nesse mesmo programa, já nos minutos finais, surge um ator de telenovelas, para fazer a seguinte pergunta com pretensão de constranger o entrevistado:

> *A grande exploração do petróleo em alto mar – o pré-sal – é feita através do bombeamento de água do mar, salgada, para aflorar o petróleo, que é mais leve. Ocorre que o petróleo é um perfeito isolante térmico enquanto a água salgada é a mais perfeita condutora térmica. Claro, o calor da massa incandescente do centro da Terra sobe até as rochas, esquenta tudo e provoca deslizamentos e enormes tsunamis, que farão desaparecer as cidades costeiras. Esse procedimento não é uma idiotice?*

O conteúdo da pergunta já exemplifica o nível de conhecimento científico daqueles que abordam o tema na mídia, cotidianamente. A pergunta mostra que o ator não conhece, ou finge não conhecer, temas como exploração e explotação petrolífera, física térmica e geologia geral.

Outro exemplo pode ser visto na ocasião em que, no início de 2013, um meteoro passou muito próximo à Terra e foi motivo de diversas notícias. Nesta ocasião, uma âncora de telejornal da CNN fez a seguinte pergunta, ao vivo, a um famoso apresentador de um programa infantil sobre ciências:

> *"Vamos chamar o "cara" da ciência, Bil Nye, e, você sabe, falar sobre outra coisa que está caindo do céu. O que está vindo em nossa direção? Isso é um efeito, talvez, do aquecimento global?". O fato se tornou motivo de piadas em redes sociais, demonstrando outro exemplo claro de despreparo das pessoas que abordam o assunto na mídia.*

Esse tipo de conteúdo é o que chega às pessoas comuns, as quais incorporam em seu modo de pensar todas essas informações equivocadas.

Onça (2007) e Rodrigues (2009) apontam como o alarmismo midiático, outrora focado na hipótese de resfriamento global de origem antrópica nas décadas de 1960 e 1970 – por causa dos aerossóis industriais – foi permutada pela hipótese do aquecimento global – causado pela liberação de dióxido de carbono oriundo da queima de combustíveis fósseis.

Em 1896, Svante August Arrhenius, que estabeleceu um modelo no qual a cada vez que se dobrasse a concentração atmosférica de CO_2 a temperatura média global se elevaria entre 5 e 6°C, mas, ao contrário de seus sucessores, ele enxergava isso como uma oportunidade para a sociedade desfrutar de um clima "melhor", com abundância de colheita, além de prever que grande parte do gás fosse ser absorvida pelos oceanos (ONÇA, 2007).

Mais tarde, Thomas Chrowder Chamberlin, elaborando modelos mais complexos do que os de Arrhenius, continuou a hipótese do efeito estufa causado por CO2, mas teve que recuar em sua posição quando as teorias astronômicas de mudanças climáticas ganharam força no começo do século XX. Além disso, Knut Ångstrom e G. C. Simpson concluíram que a participação do dióxido de carbono na absorção de radiação infravermelha era bastante restrita, pois suas bandas de absorção eram estreitas e sobrepostas pelas bandas de absorção do vapor d'água, que se mostrava dominante como gás absorvedor de radiação de onda longa (ONÇA, 2007).

Nas décadas de 1930 e 1940, Guy Stewart Callendar levantou a bandeira da influência direta do dióxido de carbono sobre a temperatura planetária, publicando diversos artigos os quais afirmavam que o Homem estava contribuindo para o aquecimento do planeta. Embora tenha sido questionado por alguns cientistas, Callendar se tornou bastante influente no meio científico.

Quando as primeiras medições diretas de CO_2 atmosférico começaram na década de 1950, revelando o acréscimo do mesmo, a hipótese do aquecimento global continuou a ganhar força. Essa ideia foi propagada pela mídia da época para a população leiga (ONÇA, 2007).

Entretanto, entre décadas de 1950 e 1970, o que se testemunhou foi uma tendência de resfriamento planetário, a qual provocou no meio acadêmico e principalmente na mídia – agora com maior alcance de público – um crescente número de publicações tratando de um resfriamento global. Mesmo com o contínuo aumento dos níveis de CO_2 – o qual fora momentaneamente relegado ao segundo plano – as temperaturas médias caíram. Ainda assim havia a hipótese do homem causar o resfriamento a partir do lançamento de aerossóis industriais na atmosfera, gerando um apelo à mitigação da causa (ONÇA, 2007).

Na figura 71 é possível identificar a tendência de aquecimento do início do século XX, a tendência de resfriamento entre 1946 e 1975 e uma nova tendência de aquecimento, mais acentuada, no final do século.

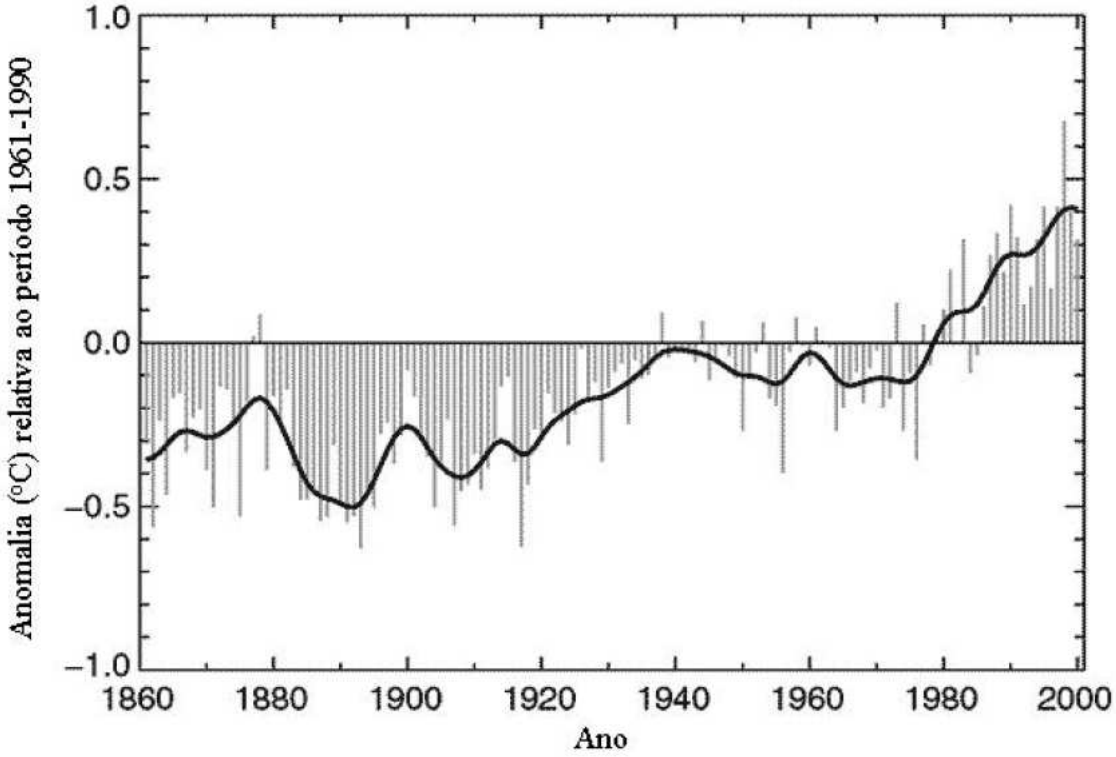


Figura 72: Anomalias anuais médias globais de temperaturas das superfícies continentais em comparação com a média do período compreendido entre 1961 e 1990.
Fonte: IPCC (2001).

Na Conferência das Nações Unidas sobre o Homem e o Meio Ambiente em Estocolmo, 1972, já se discutia uma desaceleração do crescimento econômico, diante dos danos ambientais causados pela industrialização, entre eles, as

mudanças climáticas globais causadas por dióxido de carbono e aerossóis. Contudo, ficou claro na conferência que essas restrições visavam basicamente os países emergentes, os quais se mostraram bastante contrariados. Além disso, Estocolmo-72 foi um evento amplamente divulgado por grupos de mídia em todo o mundo, sendo levado ao público leigo como uma “conferência de salvadores do planeta”.

Na década de 1980, quando as temperaturas médias globais voltaram a mostrar uma tendência de aquecimento semelhante àquela do início do século XX, a hipótese do dióxido de carbono enquanto causador de um aquecimento global voltou à tona. Coincidentemente essa hipótese voltou a ganhar foça após as primeiras crises do petróleo. Nesse período a hipótese passou a ser tratada como um fato, nem sequer mais enquanto uma teoria científica (ONÇA, 2007).

Em 1987, a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas (ONU) – ou *Comissão Brundtland*, por causa da primeira ministra norueguesa Gro-Harlem Brundtland, a qual liderou o grupo – emitiu um relatório chamado *Nosso Futuro Comum*. Esse relatório, famoso por ter introduzido o termo *desenvolvimento sustentável*, tinha um teor de inspiração na controversa teoria de Thomas Malthus, mostrando clara preocupação com o crescimento da população mundial e a escassez de recursos, obviamente insuficientes para que todos pudessem atingir o padrão de vida dos países desenvolvidos. Além disso, o relatório pregou a necessidade de *governança global*, principalmente dos recursos naturais, os quais não deveriam ser geridos por Estados, pelo bem da humanidade. A grande divulgação e aplicação do termo *desenvolvimento sustentável* até hoje mostra o impacto desse relatório e de sua ampla divulgação.

Para Lindzen (1992 *apud* ONÇA, 2007), foi em 1988, ano com verão bastante quente no hemisfério norte, que a hipótese do aquecimento global antropogênico ganhou mais força, bastante amplificado pela temática ambiental crescente desde Estocolmo-72. Os meios de comunicação já bastante desenvolvidos difundiram fotos de cenas trágicas de leitos de rios secos em uns locais e enchentes causadas por chuvas torrenciais em outros.

Cientistas como James Hansen, diretor do Instituto Goddard de Estudos Espaciais da NASA, dando entrevistas para televisão e jornais diversos, declararam à mídia que verões como o de 1988 cresceriam em número devido ao aquecimento global antropogênico (PHILANDER, 1998, *apud* ONÇA, 2007).

Assim, em 1988, a Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente criaram o IPCC – Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas, o qual tem a missão de prover o mundo com um ponto de vista claramente científico acerca do atual estágio

de conhecimento sobre mudanças climáticas e seus impactos socioeconômicos e ambientais (IPCC, 2013).

A partir de então houve uma histeria crescente acerca do tema *aquecimento global*, muito explorada pelas mídias do hemisfério norte. Uma sequência de verões quentes seguintes aos de 1988 atreladas à maior percepção das pessoas para o clima colaboraram para que o *aquecimento global* se tornasse tema emergencial que exigia ações governamentais e globais. O tema alavancou muitas publicações científicas e a mídia – de forma desinformada ou manipuladora – passou a divulgar essa produção acadêmica como um *consenso científico*, do qual pactuavam “todos” os cientistas do mundo.

Políticos liberavam mais financiamentos para pesquisas sobre *aquecimento global*, as quais se tornavam mais numerosas e mais divulgadas pela mídia, a qual acabava dando respaldo aos políticos que se mostravam engajados. Um trio de elementos que se retroalimentou dentro do contexto de alarmismo.

Em 1992 a ONU promoveu a Conferência das Nações Unidas para Meio-Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Rio-92, ou Eco-92, em cuja declaração final foi estabelecido o Princípio 15, ou *Princípio da Precaução.* O site do Ministério do Meio Ambiente do Brasil (2014) traz o conteúdo do mesmo:

> *Para que o ambiente seja protegido, serão aplicadas pelos Estados, de acordo com as suas capacidades, medidas preventivas. Onde existam ameaças de riscos sérios ou irreversíveis, não será utilizada a falta de certeza científica total como razão para o adiamento de medidas eficazes, em termos de custo, para evitar a degradação ambiental.*

Os relatórios do grupo de trabalho I do IPCC (1990, 1998, 2001, 2007, 2013), os quais traziam as bases científicas sobre o aquecimento global, imensos livros contendo pesada linguagem científica, foram lançados acompanhados de resumos que visavam facilitar a compreensão das informações.

Para Rodrigues (2009), o filme *Uma Verdade Inconveniente*, de Davis Guggenheim (2006), vencedor do Prêmio Oscar de melhor documentário, com participação do político estadunidense Albert Gore, marcou um momento fundamental na histeria global acerca do tema. O filme alcançou um amplo público, foi exibido em escolas por todo o mundo. Gore mais tarde lançaria um livro homônimo igualmente sensacionalista que alcançaria vendas significativas em todo o mundo.

O filme se inicia com uma música serena e uma narração sobre uma paisagem bucólica, seguida de belas imagens da Terra vista do espaço. Mais tarde essas imagens que provocam boas sensações no público são contrastadas com cenas de furacões mostradas com fundo musical triste, inundações, blocos de gelo se desprendendo de glaciares e ursos polares se equilibrando em

pequenas banquisas de gelo. O filme ainda mostra um desenho animado o qual retrata os gases de efeito estufa como “vilões” e a famosa cena na qual Al Gore usa uma plataforma elevatória para apontar as projeções de temperatura em um gráfico claramente exagerado e colocado em escala de forma a causar bastante impacto visual.

Na primeira década do século XX se tornou muito comum na mídia citar fontes utilizando as seguintes expressões: “cientistas do IPCC”, “comunidade científica” ou “cientistas do mundo todo”. Muito comum se tornou a associação desses termos enquanto sinônimos, como se houvesse um consenso científico acerca do principal assunto tratado por essa organização internacional: O aquecimento global.

Para Rodrigues (2009) essa ideia de consenso científico foi fundamental para a difusão da hipótese do aquecimento global. E para a efetivação da imagem de um consenso foi imprescindível a atuação da mídia e o respaldo de autoridades, dando credibilidade aos pesquisadores e ao que era veiculado.

7.2. Contestações acerca do aquecimento global

Enquanto os pesquisadores que defendem a hipótese do aquecimento global antropogênico gozam de divulgação midiática ampla, apoio de governos e instituições internacionais e um estabelecido suporte do público leigo, muitos pesquisadores não se deixaram calar e têm levantado amplos questionamentos acerca da teoria hegemônica.

Um dos questionamentos é justamente acerca da hegemonia científica sobre o tema. Os três grupos de trabalho definidos pelo IPCC - um grupo I designado para estudar e publicar sobre a física da ciência climática, um grupo II que estuda os efeitos das mudanças climáticas na sociedade e um grupo III que estuda formas de mitigar o aquecimento global – tem-se o que se divulga como sendo a “maior parte dos cientistas do mundo”, ou os “melhores cientistas do mundo” no que se refere ao tema. Segundo o IPCC, seus grupos de trabalho seriam compostos pelos 2500 “melhores” cientistas do mundo, informação controversa, uma vez que se tornou público casos de pesquisadores que, por discordâncias científicas ou políticas, deixaram de colaborar com o IPCC e mesmo assim tiveram seus nomes publicados como coautores.

Apenas o grupo de trabalho I, segundo informações do próprio IPCC (2013), é composto por 209 autores, 50 revisores e cerca de 600 autores colaboradores, números os quais não podem ser considerados como a “maior parte” dos geocientistas do mundo.

Peter T. Doran e Maggie Kendall Zimmerman (2009), pretendendo defender a ideia de consenso científico do ceticismo crescente, realizaram uma pesquisa na qual enviaram a 10257 geocientistas um *e-mail* contendo duas perguntas:

1- Comparado com os níveis anteriores a 1800, você acha que as temperaturas médias globais aumentaram, diminuíram ou se estabilizaram?
2- Você acha que a atividade humana é um fator contribuinte significativo para mudar as temperaturas médias globais?

Com um índice de participação de 30,7%, considerado por eles como satisfatório para esse tipo de pesquisa, os resultados obtidos confirmaram o consenso científico sobre o aquecimento global. Mais de 90% dos entrevistados trabalhavam em instituições estadunidenses sendo a maioria Ph.D. atuantes nas áreas de geoquímica, geofísica e oceanografia. Cerca de 5% se declararam climatologistas e 8,5% declararam que metade ou mais de seus artigos publicados nos últimos cinco anos tratavam de mudanças climáticas. Segundo os autores, 90% dos participantes responderam "aumentaram" à pergunta 1 e 82% responderam "sim" à pergunta 2, sendo que os que mais corresponderam ao consenso foram aqueles que tinham mais de 50% de suas publicações recentes sobre mudanças climáticas.

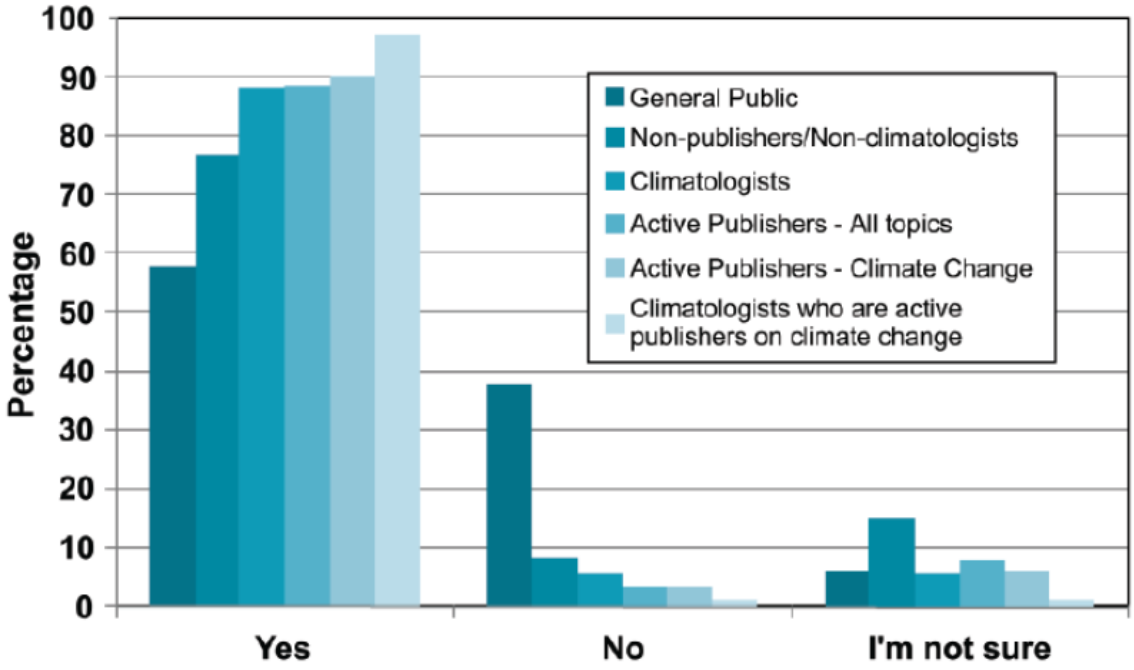


Figura 73: Índice de resposta à pergunta 2.
Fonte: Doran e Zimmerman (2009).

Contudo os autores não consideraram os seguintes pontos:

- O grupo de entrevistados é pouco heterogêneo, havendo ampla predominância de pesquisadores estadunidenses;
- Muitos pesquisadores que poderiam compor o grupo dos que ativamente publicam sobre o tema podem ter tido seus trabalhos rejeitados por periódicos cujos revisores não aceitem o questionamento da hipótese do aquecimento global antropogênico;

Ainda sobre o suposto consenso científico, John Cook (2010) não apenas cita o estudo de Doran e Zimmerman (2009), mas também citou Oreskes (2004, *apud* COOK, 2010), o qual afirmou que dentre "todos" os estudos científicos publicados entre 1993 e 2003 com o tema "mudanças climáticas globais", em um total de 928, nenhum rejeitou a ideia de consenso.

John Cook, por sinal, lançou em 2010 o *Guia Científico do Ceticismo quanto ao Aquecimento Global*, um livro digital cujo objetivo era rebater o crescente número de críticas aos argumentos "aquecimentistas".

Nessa batalha de argumentos, configuram-se enquanto "aquecimentistas" aqueles que defendem a hipótese do aquecimento global antropogênico. Já os "céticos" são aqueles que refutam essa hipótese parcial ou totalmente, mesmo havendo grandes divergências entre suas teorias defendidas.

Nesse guia, entretanto, vê-se o uso indiscriminado de uma série de referências para justificar seus argumentos, sem que essas referências realmente contribuam para tal.

Um exemplo é o artigo de Tripati *et al.* (2009), já citado neste trabalho. Primeiro Cook (2010, p.2) usa a referência para afirmar que:

> *Por causa da queima de nossos combustíveis fósseis, o CO_2 está nos níveis mais altos dos últimos 2 milhões de anos , e ainda está subindo! O argumento de que "as emissões humanas de CO_2 são minúsculas" é enganoso pois conta apenas metade da história.*

Mais à frente Cook (*op. cit, p.6)* cita novamente o artigo ao afirmar:

> *O aumento dramático das emissões de CO coincide com uma subida íngreme da concentração atmosférica de CO, que atingiu agora níveis inéditos nos últimos 2 milhões de anos, pelo menos.*

Como visto na figura 70, ela apenas evidencia que as concentrações de CO_2 variaram em torno dos valores atuais durante o Pleistoceno. Inclusive o gráfico apenas remonta até 1,4 Ma A.P. Afirmar que a causa é antrópica não está no escopo do artigo.

Já para argumentar contra os questionamentos acerca da capacidade do CO_2 em causar o aquecimento do planeta, Cook (2010, p.3) afirma:

> *O dióxido de carbono aprisiona radiação infravermelha (comumente conhecida como radiação térmica, ou radiação de onda longa). Isso foi provado em experimentos de laboratório e satélites que encontram menos calor escapando para o espaço ao longo das últimas décadas. Isso é evidência direta de que o aumento do CO2 está causando aquecimento.*

Para compor tal argumento, cita o trabalho de Burch *et al.* (1970), também aqui citado anteriormente para confirmar que a capacidade do gás em absorver radiação nessa faixa do espectro eletromagnético foi provada em laboratório,

sendo no caso desse estudo referente apenas à fraca banda em torno de 8μm e à forte banda de absorção em torno de 4μm.

Cook (*op. cit*) também um estudo de Harries *et al*. (2001), os quais detectaram diferenças no espectro de emissão infravermelho medido por satélites nos anos de 1970 e 1997. Essas diferenças são vistas nas frequências correspondentes às bandas de absorção de gases de efeito estufa, evidenciando o aumento de sua concentração na atmosfera. Contudo, os autores fazem uma ressalva de que as diferenças observadas podem ser causadas em parte por variações interanuais como o *El Niño*, que se fez presente no ano de 1997,

Por fim, Cook cita Manning e Keeling (2006) em um estudo no qual evidenciaram que a quantidade de CO_2 sequestrado pelos oceanos e pela biota terrestre condiz com o aumento do gás na atmosfera durante a era industrial.

Ou seja, as referências citadas evidenciam que o dióxido de carbono tem bandas de absorção de radiação infravermelha e que o aumento da concentração atmosférica do gás tem levado a um maior sequestro deste pelo oceano e pela biota. As referências não provam que o gás causa aquecimento, como argumenta Cook (*op. cit*).

Já o famoso “Taco de Hokey”, gráfico de grande impacto utilizado por “aquecimentistas” para divulgar sua teoria e causar alarde mostrou-se uma manipulação de dados e caiu em desuso (AZEVEDO, 2008).

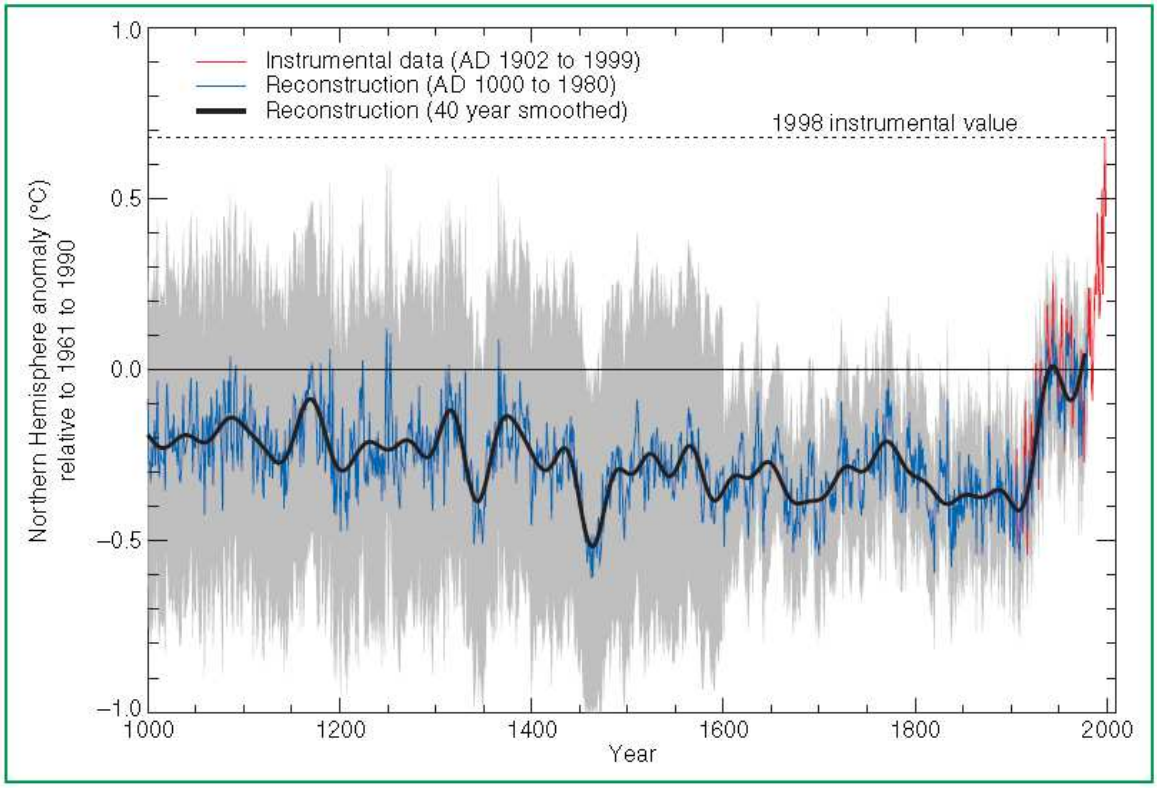


Figura 74: Famoso e amplamente contestado gráfico do “Taco de Hokey” de Michael Mann. O mesmo apresenta um prognóstico fantasioso, utilizado por Al Gore e outros para divulgar a hipótese do aquecimento global. O autor foi acusado de fraudar dados para construir este gráfico.
Fonte: IPCC (2001).

O meteorologista e pesquisador da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) Dr. Roy Spencer (2013) é um dos renomados cientistas que integram o grupo dos céticos. Para ele os modelos climáticos do IPCC apresentam inúmeras falhas, pois consideram a sensibilidade climática do sistema como alta. Spencer acredita ainda que variações climáticas percebidas em tendências de curto prazo são causadas pelo próprio sistema climático. Pequenas e caóticas flutuações nas circulações atmosférica e oceânica causam variações de nebulosidade e uma série de eventos caóticos que levam a variações climáticas. Nesse contexto, a Oscilação Decadal do Pacífico se apresenta como um fenômeno climático significativo e que é descartado pelos aquecimentistas.

Entre os cientistas que apontam para a Oscilação Decadal do Pacífico, como variabilidade interna do sistema climático, está Luís Carlos Molion (2006). Para ele, o oceano Pacífico, cuja área chega a um terço da superfície terrestre possui maior influência na dinâmica climática do que os modelos computacionais consideram atualmente. Molion (*op. cit*) também defende que os oceanos são grandes reguladores das concentrações de CO_2 atmosféricos, sendo enormes reservatórios do gás.

Outros cientistas, por sua vez, não discordam que a ação humana não cause variações climáticas, contudo, discordam do grau de interferência, como Richard Lindzen (2008, *apud* RODRIGUES, 2009). Para ele, o qual defende que o dióxido de carbono causa um aquecimento planetário, os modelos climáticos deveriam dar maior atenção à separação entre a parte antrópica e a parte natural do aquecimento.

Já Beer *et al.* (2000) acreditam que o Sol tem uma influência bastante significativa enquanto forçante climática, embora ainda considerem como significativa a contribuição humana na variação de temperatura, como mostrado na figura 71. Para esses autores, parte significativa da variabilidade de temperatura no século XX é atribuída a ações antrópicas.

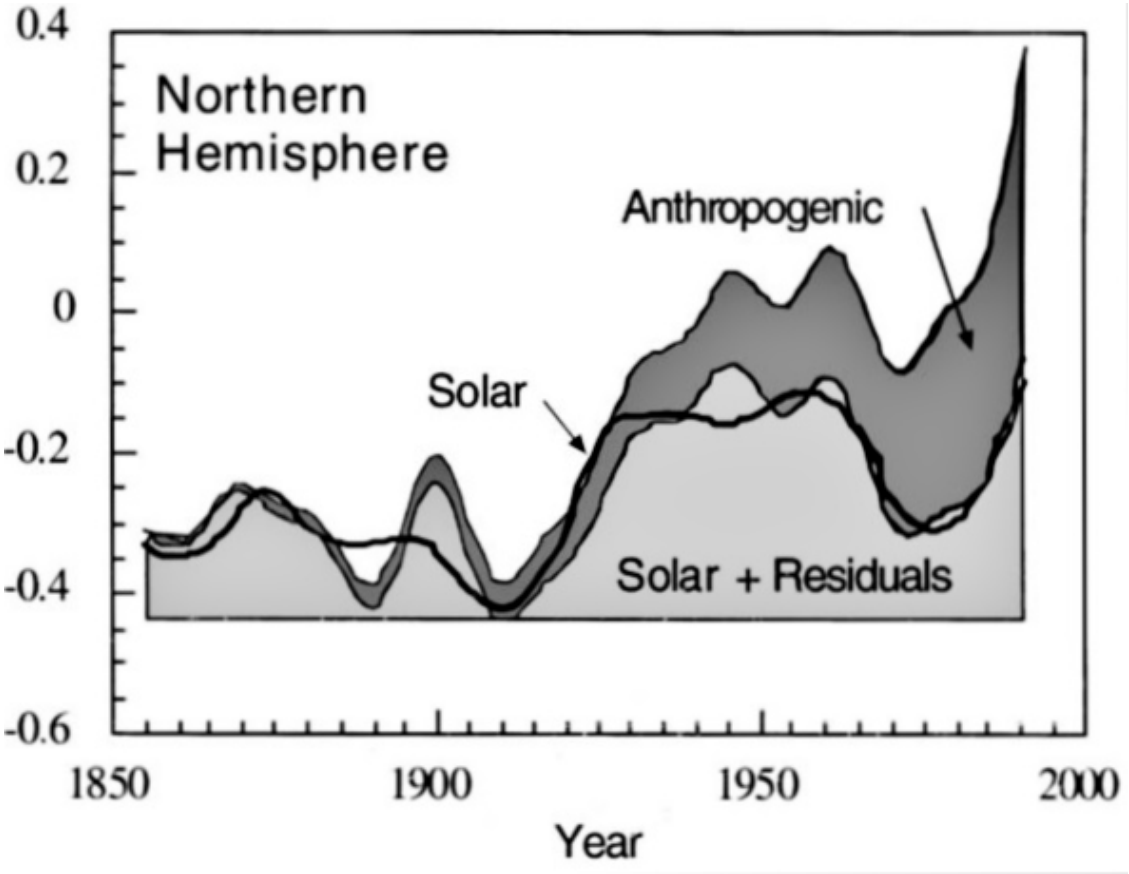


Figura 75: Separação entre as componentes antrópica e naturais da variação de temperatura média anual global.
Fonte: Beer *et al.* (2000).

8. CONCLUSÕES

Como Suguio (2010) bem explica, variações cíclicas de curto prazo são suficientemente rápidas para serem percebidas pelas pessoas, mas de pouca significância para o sistema climático global. Já aquelas variações climáticas com grande impacto sobre o sistema são imperceptíveis ao ser humano, uma vez que elas ocorrem através de pequenas flutuações que seguem uma tendência a qual só poderá ser identificada no longo prazo.

A partir das leituras realizadas, bem como pelos dados expostos, podem ser ressaltados os seguintes pontos:

- A Terra sofre influências externas significativas que modificam o aporte de energia solar, sendo essas influências inerentes ao próprio Sol ou às relações astronômicas entre este e a Terra;
- Os raios cósmicos são uma importante forçante externa que afetam indiretamente o sistema climático através de relações em rede e de retroalimentação;
- O efeito estufa é uma teoria que explica por que a temperatura média da superfície terrestre é diferente daquela prevista nos modelos teóricos. O mesmo se baseia na composição atmosférica enquanto forçante interna significativa do sistema climático;
- A Terra já foi tanto mais quente quanto mais fria do que é atualmente, tendo sido, na maior parte do tempo, mais quente. Mas durante o Quaternário, período atual do sistema, a Terra passou por diversas glaciações;
- Os níveis de dióxido de carbono atmosférico já foram bastante superiores aos atuais sem que a temperatura da superfície e o nível do mar tenham sido proporcionalmente maiores do que os atuais;
- Todas as forçantes apresentadas com boas correlações com as variações de temperatura ao longo do tempo não possuem evidências de que pudessem ter causado, sozinhas, quaisquer das variações climáticas;

A partir da perspectiva metodológica da Teoria de Sistemas, este trabalho pode concluir que:

- O Sistema Terra é um sistema aberto, dinâmico e de alta complexidade, o qual é constantemente alimentado com energia do ambiente para manter seus processos internos;
- O Sistema Terra apresenta comportamento caótico;
- O atual padrão do Sistema Terra é diferente dos padrões do passado, sendo que os elementos, a estrutura e as relações do sistema são atualmente diferentes do que foram em períodos pretéritos;

Não é possível então afirmar que as variações climáticas percebidas atualmente configuram uma mudança do clima global. Não é sabido ainda se as flutuações climáticas recentes apresentam uma tendência em longo prazo de aquecimento, indicando que o planeta migra para um novo estado de equilíbrio ou se essas flutuações são apenas parte da homeostase do sistema.

Da mesma forma não é possível apontar uma causa única para uma eventual mudança climática, uma vez que o Sistema Terra é governado por inúmeros fenômenos – muitos desconhecidos ainda – organizados em uma complexa rede de comportamento caótico.

O padrão em redes implica no fato de que todos os elementos são influenciáveis e influenciadores entre si, em escalas e magnitudes diferentes. Em um sistema onde todos os elementos causam mudanças contínuas ou eventuais nos demais, torna-se ilógico apontar uma causa única para quaisquer variações do sistema.

A própria noção de causalidade se torna ineficiente na percepção dos ciclos de retroalimentação e das flutuações homeostásicas. Assim também se torna ineficiente a noção de mudança climática, pois isto significaria uma mudança no padrão do sistema.

Para apontar uma mudança climática deveria ser comprovado que o Sistema Terra está muito afastado de seu estado de equilíbrio, com desordem interna crescente e prestes a cruzar um ponto crítico a partir do qual o caos destruirá o padrão do sistema e o transformará em um novo. Ou seja, o planeta entraria em um novo período geológico, com um novo padrão ecológico e com consequências bastante significativas para todos os organismos vivos hoje.

Sob essa ótica, também não é possível afirmar que o Homem não influencie o clima, seja através da liberação de gases pela queima de combustíveis fósseis, seja pela mudança do uso da terra, ou por outros motivos. Pode-se arguir sobre a escala e a magnitude das consequências das ações humanas sobre o Sistema Terra, mas como elemento integrante deste, o Homem é influenciado e influenciador. Questionamentos sobre o quanto o ser humano influencia o planeta ainda serão feitos por muitos anos.

Contudo, apresenta-se como equivocada a hipótese de que a liberação de CO_2 originado de atividades antrópicas – principalmente a queima de combustíveis fósseis – seja a responsável única, causadora de um aquecimento global, pelos mesmos motivos acima expostos.

BIBLIOGRAFIA

AKEMI, Marcia. **Apostila da Disciplina Meteorologia Física II - Capítulo 5**: Absorção e espalhamento. Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/fisicaII/apostila_cap_05.pdf>. Acesso em: 04 set. 2013.

AMBAUM, M. H. P. (2010) **Thermal physics of the atmosphere**. Advancing Weather and Climate Science. Wiley-Blackwell, Chichester, 240 p.

ASTROPT. **Asteróide é devido ao aquecimento global?** Disponível em: http://astropt.org/blog/2013/02/15/asteroide-e-devido-ao-aquecimento-global/. Acesso em: 11 set. 2013.

AZEVEDO, José Carlos de. Iludindo o público. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 01 jul. 2008. Caderno Opnião. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/opiniao/fz0107200808.htm>. Acesso em: 11 set. 2013.

BARROS, Juliana Ramalho; ZAVATTINI, João Afonso. Bases Conceituais em Climatologia Geográfica. **Mercator**: Revista de Geografia da UFC, Fortaleza, p.255-261, 2009. Disponível em: <http://www.mercator.ufc.br/index.php/mercator/article/viewFile/289/235>. Acesso em: 07 set. 2013.

BEARMAN, G. (ed.). **Waves, Tides and Shallow-Water Processes**. The Open University course. Pergamon. 1999.

BEER, J.; MENDE, W.; STELLMACHER, R.. The role of the sun in climate forcing. **Quaternary Science Reviews**, v. 19, p.403-415, 2000.

BERTALANFFY, Ludwig Von. **Teoria Geral dos Sistemas**. 2ª Ed. Petrópolis. Vozes, 1975.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. . **Princípio da Precaução**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/biodiversidade/biosseguranca/organismos-geneticamente-modificados/item/7512>. Acesso em: 15 jan. 2014.

BURCH, D. E., Investigation of the absorption of infrared radiation by atmospheric gases. **Semi-annual Technical Report**. n° 1, Air Force Cambridge Research Laboratories, publication U-4784. 1970. Disponível em: < http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/709894.pdf>. Acesso em: 09 set. 2013.

CAMARGO, Luís Henrique Ramos de. **A Ruptura do Meio Ambiente:** Conhecendo as mudanças ambientais do planeta através de uma nova percepção da ciência: a Geografia da Complexidade. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2005.

CANALLE, João Batista Garcia. O problema do ensino da órbita da Terra. **Física na Esola.** V.4, n. 2, p.12-16. 2003.

CAPRA, Fritjof. **A Teia da Vida:** Uma nova compreensão científica dos sistemas vivos. São Paulo: Cultrix, 1996. 256 p.

CARNEIRO, Celso dal Ré; MIZUSAKI, Ana Maria Pimentel; ALMEIDA, Fernando Flávio Marques de. A determinação da idade das rochas. **Terrae Didática**, Campinas, v. 1, n. 1, p.6-

35, dez. 2005. Anual. Disponível em: <http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v1/pdf-v1/p006-035_carneiro.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2014.

CASSAB, R. C. T. Objetivos e Princípios. *In*: CARVALHO, I. S. **Paleontologia.** Volume 1. 3ª ed.. Rio de Janeiro: Interciência. 2010

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec-Edusp, 1979. 106p.

COELHO, Mara Cristina da Silveira. **Análise do Determinismo em Séries Temporais Quase Periódicas**. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

COOK, John. **O guia científico do ceticismo quanto ao aquecimento global.** Online desde dezembro de 2010. Disponível em: <http://www.skepticalscience.com>. Acesso em: 30 ago. 2013.

DAVIS Jr., R. A.; FITZGERALD, D. M. **Beaches and Coasts**. Blackwell Publishing. UK. 2004.

DUARTE, Romero Meyrelles. CLIMASOL: Um programa computacional auxiliar ao ensino de climatologia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA, 15., 2013, Vitória. **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Geografia Física**. Vitória: Ufes, 2013. p. 95 - 103. CD-ROM.

DUTRA, T. L. Paleoecologia. *In*: CARVALHO, I. S. **Paleontologia.** Volume 1. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2010.

FELÍCIO, Ricardo Augusto. Entrevista no Programa do Jô: **Programa do Jô**, Rio de Janeiro: 02 mai. 2013. Entrevista concedida a Jô Soares.

GEEKNISSES. **Dez curiosidades legais sobre nossa galáxia**: Via Láctea. Disponível em: <http://www.geeknisses.com.br/galaxia-via-lactea/>. Acesso em: 30 ago. 2013.

GUGGENHEIM, Davis. **An inconvenient truth.** EUA: Paramount. 2006.

HARRIES, John E. et al. Increases in greenhouse forcing inferred from the outgoing longwave radiation spectra of the Earth in 1970 and 1997. **Nature**, v. 410, p.355-357, 15 mar. 2001. Disponível em: <https://workspace.imperial.ac.uk/physics/Public/spat/John/Increase%20in%20greenhouse%20forcing%20inferred%20from%20the%20outgoing%20longwave%20radiation%20spectra%20of%20the%20Earth%20in%201970%20and%201997.pdf>. Acesso em: 11 set. 2013.

IPCC. **Intergovernmental Painel on Vlimate Change**. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 11 set. 2013.

_____. **Climate Change 2001**: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Nova York: Cambridge University Press, 2001. Disponível em: <http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/>. Acesso em: 11 set. 2013.

_____. **Climate Change 2007**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. Disponível em: <http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/>. Acesso em: 11 set. 2013.

_____. **Working Group I**: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Disponível em: <http://www.climatechange2013.org/>. Acesso em: 11 set. 2013.

KIRKBY, Jasper et al. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. **Nature**, v. 476, n. 7361, p.429-433, 25 ago. 2011. Disponível em: <http://www.nature.com/nature/journal/v476/n7361/full/nature10343.html>. Acesso em: 09 set. 2013.

PINHEIRO, Carlos Alberto Kuster. **Contribuição Geográfica ao Estudo das Unidades de Conservação Sob o Enfoque Sitêmico**: O Caso do Parque Natural Municipal de Jacarenema, Vila Velha (ES). 2011. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geografia, UFES, Vitória, 2011.

LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas. **O que são raios cósmicos?** Online desde 28 mar. 2007. Disponível em: <http://www.lip.pt/experiments/trc/oqsao/oqsao1.html>. Acesso em: 30 ago. 2013.

LIOU K. N., 2002. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. Second Edition International Geophysics Series, vol. 84, Academic Press pp. 583.

MANNING, Andrew C.; KEELING, Ralph L.. Global oceanic and land biotic carbon sinks from the Scripps atmospheric oxygen flask sampling network. **Tellus B**: Chemical and physical meteorology, Singapore, v. 58, n. 2, p.85-116, 14 mar. 2006. Disponível em: <http://bluemoon.ucsd.edu/publications/manning/ManningandKeeling2006.pdf>. Acesso em: 11 set. 2013.

MARTINELLI, Luiz Antonio *et al*. **Desvendando Questões Ambientais com Isótopos Estáveis**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 144 p.

MARUYAMA, Shigenori. **Aquecimento Global?** Tradução de Kenitiro Suguio São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 125 p. Título original: Do not be taken in by the global warming theory.

MENDONÇA, Francisco de Assis. **Geografia e Meio Ambiente**. 6 ed., São Paulo: Contexto, 2002.

MENDONÇA, Francisco de Assis; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia**: Noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 206 p.

MIRANDA, J. M. et al. **Fundamentos de Geofísica**. Lisboa: Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2000. 139 p. Disponível em: <http://www.yumpu.com/pt/document/view/12936618/fundamentos-de-geofisica-universidade-de-lisboa>. Acesso em: 09 set. 2013.

MOLION, Luís Carlos Baldicero. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e oscilação decadal do pacífico. **Climanálise**, São José Dos Campos, ano 3, n. 1, 2006. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/Artigo_Aquecimento_0805.pdf>. Acesso em: 11 set. 2013.

NEFF, U. et al. Strong coherence between solar variability and themonsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. **Nature**, v. 411, p.290-293, 17 maio 2001. Disponível em: <http://www.nature.com/nature/journal/v411/n6835/pdf/411290a0.pdf>. Acesso em: 09 set. 2013.

NETTO, Luiz Ferraz. **A Terra**: Estações do ano. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala24/24_E16.asp.>. Acesso em: 09 set. 2013.

OLIVEIRA, Lucimar Luciano; VIANELLO, Rubens Leite; FERREIRA, Nelson Jesus. **Meteorologia fundamental**. Erechin: EDIFAPES, 2001. 432 p.

ONÇA, Daniela de Souza. O fluxo de raios cósmicos como agente de mudanças climáticas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 8., 2008, Alto Caparaó. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica**. UFU, 2008. p. 161 - 176. Disponível em: <http://www.fakeclimate.com/arquivos/ArtigosFake/TEC06.pdf>. Acesso em: 09 set. 2013.

_____. **Curvar-se diante do existente**: o apelo às mudanças climáticas pela preservação ambiental. 2007. 243 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geografia, Usp, São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-05112007-121023/pt-br.php>. Acesso em: 11 set. 2013.

PACCA, Igor. I.G.; McREATH, Ian. A Composição e o Calor da Terra, in: TEIXEIRA *et al*. **Decifrando a Terra.** São Paulo. Oficina de Textos. 2000.

PAGANI, Mark et al. Marked Decline in Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations During the Paleogene. **Science**, v. 309, n. 5734, p.600-603, 2 jun. 2005. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/content/309/5734/600.full>. Acesso em: 09 set. 2013.

RIEBEEK, Holli. **Paleoclimatology**: Explaining the evidence. Online desde 9 de maio de 2006. Disponível em: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Paleoclimatology_Evidence/>. Acesso em: 09 set. 2013.

ROCHA-CAMPO, A. C.; DOS SANTOS, P. R. Ação Geológica do Gelo, in: TEIXEIRA *et al*. **Decifrando a Terra.** São Paulo. Oficina de Textos. 2000.

RODRIGUES, Alexandre Augusto Kitzberger. Aplicação da teoria de sistemas não lineares e caóticos na análise de sistemas estruturais. **REPET**, Guaratinguetá, 2004. Disponível em: <http://www.feg.unesp.br/entidades/rePET/02.pdf>. Acesso em: 04 set. 2013.

RODRIGUES, Guilherme Polli. **A farsa do aquecimento global**. 2009. 79 f. Trabalho de Graduação (Graduação) - Departamento de Geografia, Usp, São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.fakeclimate.com/arquivos/MaterialDid%C3%A1ticoClimaGeo/MudClim/02-MatDid/A01-TGI-GuilhermePolli.pdf>. Acesso em: 11 set. 2013.

RODRIGUES, Olívia Maria Arteiro do Couto. **O Ciclo Solar**. 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Matemática Aplicada, Universidade do Porto, Porto, 2000. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/10010/3/3225_TM_01_P.pdf>. Acesso em: 09 set. 2013.

RUTHERFORD, Scott**. Milankovitch Cycles in Paleoclimate**. Online desde 1 de janeiro de 2000. Disponível em: <http://deschutes.gso.uri.edu/~rutherfo/milankovitch.html>. Acesso em: 09 set. 2013.

SALAMUNI, Eduardo. **Geotectônica e Tectônica Global.** Aula 3: O interior da Terra e a Litosfera. Notas de aula. Disponível em: <http://www.neotectonica.ufpr.br/aula-geotectonica/aula3.pdf>. Acesso em: 09 set. 2013.

SALGADO-LABORIAU, Maria Léa. **História ecológica da Terra**. São Paulo: Edgard Blücher. 1994.

SCHWARZACHER, Walther. The Milankovitch Theory. In: SCHWARZACHER, Walther.**Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory.** Amsterdam: Elsevier, 1993. Cap. 3, p. 29-48.

SHAVIV, Nir J.. Cosmic Ray Diffusion from the Galactic Spiral Arms, Iron Meteorites, and a Possible Climatic Connection. **Physical Review Letters** 89, 5 nov 02, 2002. Disponível em: < http://prl.aps.org/abstract/PRL/v89/i5/e051102>. Acesso em 05 set. 2013.

_____. The Spiral Structure of the Milky Way, Cosmic Rays, and Ice Age Epochs on Earth. **New Astronomy**. p.39-77, ago. 2003. Disponível em: <http://www.phys.huji.ac.il/~shaviv/articles/long-ice.pdf>. Acesso em: 09 set. 2013.

_____. Cosmic Rays and Climate. **Physicaplus**, n. 5, 01 maio 2005. Disponível em: < www.sciencebits.com/CosmicRaysClimate>. Acesso em: 05 set. 2013.

SOKOLIK, Irina N.. **Absorption by atmospheric gases in the IR, visible and UV spectral regions**. 2009. Disponível em: <http://www.School of Earth and Atmospherichttp://irina.eas.gatech.edu/EAS8803_Fall2009/Lec6.pdf>. Acesso em: 04 set. 2013.

_____. **Absorption/emission by atmospheric gases, Solar, IR and microwave spectra of main atmospheric gases**. Disponível em: <http://www.heliosat3.de/e-learning/remote-sensing/Lec7.pdf>. Acesso em: 04 set. 2013.

SPENCER, Roy. **Global Warming**. Disponível em: <http://www.drroyspencer.com/>. Acesso em: 11 set. 2013.

SUGUIO, Kenitiro; SUZUKI, Uko. **A Evolução Geológica da Terra e a Fragilidade da Vida**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 152 p.

SUGUIO, Kenitiro. **Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 408 p.

SVENSMARK, Henrik. Cosmic rays and Earth's climate. **Space Science Reviews**, v. 93, p.155-166, 2000. Disponível em: <http://ruby.fgcu.edu/courses/twimberley/EnviroPhilo/Svensmark.pdf>. Acesso em: 09 set. 2013.

_____. Cosmoclimatology: a new theory emerges. **Astronomy & Geophysics**, v. 48, p.1.18-1.24, fev. 2007. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1468-4004.2007.48118.x/abstract>. Acesso em: 09 set. 2013.

TRICART, Jean. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/Diretoria Técnica/SUPREN, 1977. 91 p. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/ecodinamica.pdf>. Acesso em: 09 set. 2013.

TRIPATI, Aradhna K.. Coupling of CO2 and Ice Sheet Stability Over Major Climate Transitions of the Last 20 Million Years. **Science**, v. 326, p.1394-1397, 4 dez. 2009. Http://www.sciencemag.org/content/326/5958/1394.full.

TURTELLI, Armando. **O que são raios cósmicos?** Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/~turtelli/rc.html>. Acesso em: 30 ago. 2013.

VIANELLO, Rubens Leite; ALVES, Adil Rainier. **Meteorologia Básica e Aplicações.** Viçosa: Ufv, 1991.

VICENTE, Luíz Eduardo; PEREZ FILHO, Archimedes. Abordagem Sistêmica e Geografia. **Geografia**. Rio Claro: v. 28, n. 3, p. 345-362, set./dez., 2003.

ZEEBE, Richard E. et al. Carbon dioxide forcing alone insufficient to explain Palaeocene–Eocene Thermal Maximum warming. **Nature Geoscience**, n 2. , p.576-580, 13 jul. 2009. Disponível em: <http://www.soest.hawaii.edu/oceanography/faculty/zeebe_files/Publications/ZeebeNGS09.pdf> . Acesso em: 09 set. 2013.