



Universidade Federal da Bahia
Universidade Estadual de Feira de Santana



Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências

Bases epistemológicas para um modelo funcional em Gaia

Nei Freitas Nunes Neto

Orientador: Prof. Dr. Charbel Niño El-Hani

Salvador, Bahia
2008

Universidade Federal da Bahia
Universidade Estadual de Feira de Santana
Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências

Bases epistemológicas para um modelo funcional em Gaia

Nei Freitas Nunes Neto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências (UFBA/UEFS) como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre

Orientador: Prof. Dr. Charbel Niño El-Hani

Salvador, Bahia
2008

Universidade Federal da Bahia
Universidade Estadual de Feira de Santana
Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências

Bases epistemológicas para um modelo funcional em Gaia

Nei Freitas Nunes Neto

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Charbel Niño El-Hani (orientador)
Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Prof. Dr. Fábio Pedro Souza de Ferreira Bandeira
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)

Prof. Dr. Gustavo Andrés Caponi
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

“Céu e terra não tem atributos e não estabelecem diferenças: tratam as miríades de criaturas como cachorros de palha.”

Lao Tsé¹

¹ Estes versos de Lao Tsé, parte do *Tao Te Ching*, reforçam uma idéia apresentada de maneira algo vaga por Lovelock em diversos de seus escritos, a de que uma espécie que degenera seu próprio ambiente, tende a ser eliminada do sistema da qual é parte, através da ação de mecanismos cibernéticos de controle do próprio sistema. Os versos remetem a antigos rituais chineses nos quais “cachorros de palha eram usados como oferendas para os deuses. Durante o ritual, eram tratados com a mais profunda reverência. Quando terminava, e não sendo mais necessários, eram pisoteados e jogados fora.” (Gray, 2007, p. 50).

AGRADECIMENTOS

A Charbel, com quem muito tenho aprendido, pela parceria e orientação durante todos estes anos.

Aos professores Fábio Bandeira e Gustavo Caponi, por aceitarem tão gentil e prontamente participar das bancas de qualificação e de defesa.

Ao professor Olival Freire Jr., pelo olhar crítico, que contribuiu para a melhoria do trabalho.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em História, Filosofia e Ensino de Ciências Biológicas (GPHFECB), sobretudo Ricardo e Dani, pelas discussões em torno de assuntos comuns.

Aos colegas do mestrado, pela companhia durante os últimos anos.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa, que permitiu a realização deste trabalho.

À FAPESB, pela concessão de apoio financeiro para a realização da pesquisa.

Aos secretários do Programa, Lene e Orlando, pelo auxílio em questões burocráticas.

A Peter Liss, Jill Caine, Roger Cropp, Sérgio Vallina, Stephen Archer, Roland Von Glasow e Mike Smith, pelo envio de seus artigos científicos, importantes para o desenvolvimento do trabalho.

A todos os meus amigos, pela compreensão e apoio nos momentos difíceis.

A minha família, de quem tenho recebido todo o apoio, e sem a qual nada seria possível.

A Leda, pela paciência e por todo o carinho que a mim tem dedicado.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	i
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
CAPÍTULO 1	
Gaia: questões epistemológicas e implicações para a compreensão do sistema Terra	1
Resumo.....	1
Abstract.....	1
1. Introdução.....	2
2. O surgimento e o desenvolvimento do programa de pesquisa Gaia.....	3
3. Os múltiplos significados de Gaia.....	13
4. Gaia enquanto movimento científico.....	15
5. Gaia e a Ciência do Sistema Terra.....	20
6. Questões epistemológicas suscitadas por Gaia.....	25
6.1. Atribuição de vida a Gaia (ou à Terra).....	25
6.2. Uso de explicações teleológicas ou funcionais.....	29
6.3. Gaia e seleção natural.....	33
7. Sobre algas e nuvens.....	40
8. Considerações finais.....	50
Referências.....	52
CAPÍTULO 2	
Neo-teleologia e análise funcional nas ciências biológicas	62
Resumo.....	62
Abstract.....	62
1. Introdução.....	63
2. Síntese ou pluralismo.....	65
3. A perspectiva de Larry Wright sobre as funções: a teoria padrão das abordagens etiológicas selecionistas.....	71
4. A neo-teleologia.....	77
4.1. Dois tipos de neo-teleologia.....	81
5. A análise funcional de Cummins.....	86
6. Críticas dirigidas a Cummins.....	93
6.1. Objeção do excesso de liberalidade.....	93
6.2. Suposição de que a evolução é um processo unicamente gradual.....	96
6.3. A ausência de distinção entre função e acidente.....	103
7. Considerações finais.....	104
Referências.....	107

CAPÍTULO 3

Análise Funcional do Sistema CLAW	112
Resumo.....	112
Abstract.....	112
1. Introdução.....	113
2. Teleologia e função em Gaia.....	116
3. Análise funcional.....	120
4. Decomposição, localização e integração em sistemas complexos.....	127
4.1. As decomposições de Volk.....	130
5. Rumo a um modelo funcional em Gaia.....	133
5.1. Sobre algas, nuvens e o clima global.....	133
5.2. CLAW pode ser concebido como um sistema cibernético funcionalmente integrado.....	138
5.3. Decomposições possíveis do sistema CLAW.....	139
5.4. Análise funcional do sistema CLAW.....	141
5.5. Uma contribuição da análise funcional de Cummins para a superação da tensão entre Gaia e o darwinismo.....	146
6. Limites do modelo.....	149
7. Considerações finais.....	150
Referências.....	152

CAPÍTULO 4

Implicações de Gaia para o ensino de biologia	157
Resumo.....	157
Abstract.....	157
1. Introdução.....	157
2. O programa de pesquisa Gaia.....	158
3. Aspectos gerais sobre a inserção de Gaia no ensino de ciências.....	161
3.1. Transposição didática de Gaia.....	161
3.2. Contribuições de Gaia para um ensino de ciências contextualizado histórica e filosoficamente.....	163
3.3. Gaia frente às questões ambientais contemporâneas.....	164
4. Considerações finais.....	167
Referências.....	168

REFERÊNCIAS	172
--------------------------	-----

Apresentação

O texto ora apresentado como dissertação de mestrado é o resultado de investigações empreendidas no Grupo de Pesquisas em História, Filosofia e Ensino de Ciências Biológicas (GPHFECB, UFBA), e no Programa de Pós-Graduação em Ensino, História e Filosofia das Ciências (UFBA-UEFS) sob a orientação do Prof. Charbel El-Hani, desde março de 2006. Estas investigações se apóiam em estudos anteriores, os quais realizei durante minha graduação em Ciências Biológicas, já no GPHFECB, também sob orientação do Prof. Charbel.

A dissertação se divide em quatro capítulos, descritos brevemente a seguir:

1. Gaia: questões epistemológicas e implicações para a compreensão do sistema Terra.

Neste capítulo tratamos do surgimento do programa de pesquisa científico Gaia na década de 1960 e de seu desenvolvimento nas décadas subseqüentes. Abordamos as principais críticas dirigidas ao programa, desde uma perspectiva epistemológica, e apresentamos um estudo de caso, sobre a conexão algas-nuvens, no qual buscamos mostrar o poder heurístico deste programa e suas contribuições para uma melhor compreensão do sistema Terra. A importância destas discussões é evidente diante da crise ecológica contemporânea e por isso não pode ser negligenciada.

2. Neo-teleologia e análise funcional nas ciências biológicas.

Este capítulo aborda o intenso debate sobre explicações funcionais que tem ocorrido na filosofia da biologia recente, com destaque para a abordagem etiológica selecionista de Larry Wright e a análise funcional de Robert Cummins. Apoiamos a tese do consenso dualista de Godfrey-Smith, o qual deve apoiar-se na distinção entre biologia funcional e evolutiva, apresentada por Mayr e Jacob. Discutimos também a análise funcional de Cummins, e apresentamos a crítica deste filósofo às abordagens etiológicas selecionistas, as quais ele nomeou neo-teleologia. Abordamos ainda algumas críticas dirigidas contra Cummins.

3. Análise funcional do sistema CLAW. Neste capítulo, apresentamos um modelo de aplicação da análise funcional de Cummins ao programa de pesquisa Gaia. O objeto do nosso modelo é o sistema CLAW, um subsistema de Gaia, que integra algas oceânicas, compostos voláteis de enxofre, nuvens sobre os oceanos e o clima global. Esperamos ter produzido um modelo heurísticamente rico para o tratamento das atribuições/explicações funcionais no programa de pesquisa Gaia, que permita uma melhor compreensão dos processos envolvidos na dinâmica global.

4. Implicações de Gaia para o ensino de biologia. Com este capítulo, pretendemos discutir as implicações de nossas pesquisas sobre Gaia para o ensino de biologia, apoiando-nos também em trabalhos prévios de nosso grupo de pesquisa.

Cada capítulo da dissertação foi organizado na forma de um artigo, razão pela qual pode ser lido independentemente dos outros. Pela mesma razão, o texto de cada capítulo está formatado de acordo com as normas do periódico ao qual pretendemos submetê-lo, o que também inclui as listas de referências ao final de cada capítulo. Além disso, repetições de certos conteúdos, como informações básicas sobre Gaia, são inevitáveis nos vários capítulos. Apresentamos um resumo e um abstract no começo da dissertação, que contemplam todo o trabalho dissertativo, e, além disso, cada capítulo também tem seu próprio resumo e abstract. Ao final da dissertação apresentamos a lista das referências de todos os capítulos. Ressaltamos, contudo, que tal organização não impede que a dissertação seja lida como um texto único.

Esperamos, com este trabalho, contribuir para um avanço na compreensão do programa de pesquisa Gaia, por meio da análise de seus fundamentos epistemológicos. Na medida em que se trata de um programa de pesquisa que se pronuncia sobre a Terra, ou de um modo mais geral, sobre as interações entre a vida e seu meio, esperamos que o trabalho aqui desenvolvido possa ter implicações para a construção do conhecimento científico sobre o nosso planeta e seus subsistemas, assim como para o modo como podemos ou devemos intervir no sistema Terra, diante das mudanças ambientais globais. A percepção da dimensão da crise ecológica que as sociedades humanas enfrentam contemporaneamente,

acreditamos, é tão mais clara e evidente quanto mais nos debruçamos sobre a ciência que é produzida sobre a Terra, principalmente sobre a interação entre a vida e o ambiente físico-químico em escala global.

A última conferência do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), realizada no ano de 2007, e os relatórios que dela resultaram, reduziram enormemente as dúvidas que restavam sobre as causas principais do aquecimento global. Tornou-se mais claro, em particular, que não se trata de um processo somente natural, mas sim de uma alteração do clima planetário provocada pela espécie humana. Mais de 2,5 mil cientistas de 130 países e de diversas áreas alcançaram conclusões muito mais contundentes do que aquelas relatadas nos relatórios anteriores (IPCC, 2007).

Uma imensa quantidade de conhecimento científico sobre o funcionamento de nosso planeta e de seus subsistemas, tem sido produzido nas últimas décadas. Entretanto, ainda que conhecimento científico seja um fator necessário para levar a cabo as transformações sociais exigidas por uma mudança climática, ele está longe de ser suficiente para tal. Precisamos também, de ações urgentes, individuais e coletivas. Não há tempo para procrastinação, pois o risco de extinção do animal humano já não é mais apenas um tema de ficção científica.

Resumo

Gaia é um programa de pesquisa científico, que foi proposto pelo químico inglês James Lovelock, no final da década de 1960, a partir de estudos desenvolvidos por ele para a NASA, com o objetivo de formular métodos para a detecção de vida em outros planetas. O programa de pesquisa foi fortemente rejeitado pela comunidade científica nos primeiros anos de sua história, ao passo que foi recebido com entusiasmo por grupos espiritualistas e ambientalistas. Entretanto, a rejeição da comunidade científica tem sido significativamente reduzida, sobretudo a partir de meados dos anos 1980 e anos 1990. Neste trabalho, temos como objetivo oferecer uma abordagem consistente para as atribuições e explicações funcionais no programa de pesquisa. Assim, para alcançar o objetivo, realizamos nosso trabalho em duas vertentes. Na primeira, apresentamos uma discussão sobre o surgimento e o desenvolvimento de Gaia enquanto um programa de pesquisa, as questões epistemológicas suscitadas por ele e suas implicações para a compreensão do sistema Terra. Na segunda vertente, discutimos as atribuições e explicações funcionais na filosofia da biologia, com ênfase para duas teorias: a abordagem etiológica seletcionista de Larry Wright e a análise funcional de Robert Cummins. Defendemos que as duas teorias são empreitadas distintas e que não devem ser unificadas numa única abordagem sobre as funções. Isto levamos a apoiar a tese do consenso dualista de Godfrey-Smith. Apresentamos também a crítica de Cummins às abordagens etiológicas seletcionistas, as quais ele rotulou de neo-teleologia. Apesar de algumas das críticas de Cummins localizarem corretamente falhas naquela abordagem, outras críticas perdem de vista pontos importantes das abordagens etiológicas de função, que não podem ser deixadas de lado. A partir das críticas de ambos os lados do debate filosófico, a compreensão sobre função na biologia, é sobremaneira enriquecida. Em seguida, a partir das discussões anteriores, nos voltamos especificamente para as atribuições e explicações funcionais em Gaia, construindo uma síntese dos argumentos apresentados nas duas vertentes do trabalho. Buscamos uma solução para a questão teórica investigada a partir da perspectiva sobre as funções de Cummins. Para este filósofo, função é uma capacidade de um ítem à qual recorremos para compreender a realização de uma capacidade do sistema que o contém. Após discutir questões como decomposição e localização em sistemas complexos e em Gaia, aplicamos a teoria de Cummins sobre as funções a um subsistema de Gaia, o sistema proposto pela hipótese CLAW, que interliga algas oceânicas, compostos voláteis de enxofre, nuvens sobre os oceanos e o clima global. O resultado de tal aplicação é um modelo funcional do sistema, onde as capacidades dos componentes são tratadas como as funções destes e explicam, juntamente com a organização do sistema, a realização da capacidade sistêmica em questão, a saber, a produção de nuvens sobre os oceanos. O modelo proposto permite concluir que a análise funcional de Cummins fornece um quadro teórico consistente para a construção de explicações funcionais consistentes em Gaia e pode contribuir também para a superação do problema das explicações teleológicas no programa de pesquisa. Por fim, consideramos as implicações de Gaia para o ensino de ciências, especialmente o de biologia, na medida em que ela já está presente nos livros didáticos de biologia do ensino médio. Além disso, Gaia pode ser uma interessante via de inserção de história e filosofia da ciência no ensino de ciências, assim como pode contribuir para a abordagem de temas ambientais.

Palavras-chave: Gaia, Lovelock, análise funcional, Cummins, teleologia, hipótese CLAW.

Abstract

Gaia is a scientific research programme, that was put forward by English chemist James Lovelock, at the end of the 1960's, from his studies for NASA, whose goals were the elaboration of methods for the detection of life in other planets. The research programme was strongly rejected by the scientific community in the first years of its history, whereas it was enthusiastically grasped by environmentalist and spiritualist groups. However, the rejection of the scientific community has been drastically reduced, mainly from the mid 1980's and during the 1990's. In this work, our goal is to offer a consistent approach to the functional ascriptions and explanations in the research programme. Thus, to achieve the goal, we constructed our work in two pathways. In the first one, we present a discussion on the appearance and development of Gaia as a research programme, the epistemological issues raised by it and its implications to the understanding of the Earth system. In the second pathway, we discuss functional explanations and ascriptions in philosophy of biology, with special emphasis on two theories: selectionist etiological approach of Larry Wright and the functional analysis, of Robert Cummins. We hold that these two theories are distinct enterprises and as such, they should not be unified into one single approach on the functions. This led us to support Godfrey-Smith's dualist consensus thesis. We show also the critiques of Cummins to the selectionist etiological approaches, which he labelled neo-teleology. Although some of Cummins' critiques point correctly to flaws in those approaches, others loose from sight important aspects of selectionist etiological approaches. Critiques from both sides of the philosophical debate lead to a richer comprehension of the role of function in biology. From the previous discussions, we turn then to the functional ascriptions and explanations in Gaia, building a synthesis of the exposed arguments in the two pathways of the work. We look for a solution to this theoretical issue taking as a starting point the perspective on functions developed by Cummins. According to Cummins' functional analysis, global capacities of complex systems should be explained by the capacities of components of the system. After discussing decomposition and localization in complex systems and in Gaia, from the theoretical frame developed by Bechtel & Richardson, we apply Cummins' functional analysis on a subsystem of the Gaia system, the system proposed by the CLAW hypothesis, which links oceanic algae, sulfur compounds, clouds over the oceans and the global climate. The result of this application is a functional model of the system, where the capacities of the component parts are treated as their functions and explain, together with the organization of the system, the realization of the systemic capacity at stake, namely, the cloud production over the oceans. The proposed model allows us to conclude that Cummins' functional analysis offers a consistent theoretical framework to the building of consistent functional explanations in Gaia and can contribute also to overcome the problem of the teleological explanations in the research programme. At last, we consider the implications of Gaia to the science teaching, specially biology, in the extent that it is already found in high-school biology textbooks. Moreover, Gaia might be an interesting path to insert history and philosophy of science in the science teaching, as well as, can contribute to the approach of environmental issues.

Keywords: Gaia, Lovelock, functional analysis, Cummins, teleology, CLAW hypothesis.

CAPÍTULO 1

Gaia: questões epistemológicas e implicações para a compreensão do sistema Terra²

Resumo: O programa de pesquisa Gaia surgiu no final da década de 1960 a partir de estudos desenvolvidos pelo químico inglês James Lovelock, para a NASA. Apesar de ter enfrentado grande resistência da comunidade científica nas décadas de 1960 e 1970, Gaia tem sido cada vez mais aceito como um programa de pesquisa científico. Neste artigo, discutimos as principais questões epistemológicas relacionadas ao programa de pesquisa iniciado por Lovelock e apontamos direções nas quais, em nosso entendimento, ele pode continuar a desenvolver-se com sucesso. Argumentamos, ainda, que o programa de pesquisa Gaia contribui para uma compreensão integrada dos sistemas terrestres e poderia, assim, desempenhar papel mais ativo na construção da Ciência do Sistema Terra. Para consubstanciar este argumento, discutimos o poder heurístico do referido programa, através do exame de um campo de pesquisas recente, conhecido como conexão algas-nuvens, que foi gerado a partir dele. A partir da importância deste campo para a compreensão do clima global, exemplificamos a relevância de Gaia para as discussões atuais sobre mudanças climáticas.

Palavras-chave: Gaia, questões epistemológicas em Gaia, Ciência do Sistema Terra, Conexão algas-nuvens, Hipótese CLAW, Mudanças climáticas.

Abstract: Gaia research program appeared in the end of the 1960s, from studies developed by the English chemist James Lovelock for NASA. Despite facing great resistance by the scientific community, in the 1960s and 1970s, Gaia has become more and more accepted as a scientific research program. In this paper, we address the main epistemological issues related to Gaia and indicate directions in which the research program can continue – to our understanding – to successfully develop. We also argue that the Gaia research program contributes to an integrated understanding of Earth systems and, this, could play a more active role in the construction of an Earth System Science. To support this argument, we discuss the heuristic power of Gaia, based on a survey of a recent research field resulting from it, known as cloud-algae link. Based on the importance of this field to the understanding of global climate, we exemplify the relevance of Gaia to current discussions about climate change.

Keywords: Gaia, epistemological issues in Gaia, Earth System Science, Cloud-algae link, CLAW hypothesis, Climate change.

² Este artigo será submetido a *Scientiae Studia*.

“If verified, the Gaia hypothesis would represent a revolution in biogeochemistry, for it represents a fundamentally different view of the role of life on Earth.”

James Kirchner (1989, p. 224)

1. Introdução

Com este artigo, pretendemos apresentar o desenvolvimento histórico do programa de pesquisa Gaia iniciado em fins da década de 1960 pelo químico inglês James Eprhaim Lovelock, assim como as principais questões epistemológicas relacionadas a ele. Buscaremos argumentar, nos apoiando na filosofia da ciência desenvolvida por Imre Lakatos ([1970]1995; ver também Larvor, 1998), e também em um trabalho anterior de nosso grupo de pesquisas (Lima-Tavares, 2003) que Gaia constitui um programa de pesquisa científico progressivo. Por conta disso, ele não pode ser ignorado nas discussões atuais sobre mudanças climáticas. A partir daí, esperamos também estimular discussões mais gerais sobre a dinâmica planetária e as interrelações complexas que se estabelecem entre os seres vivos e seu ambiente³ físico-químico em escala global.

Além disso, pretendemos ressaltar com este trabalho, que o desenvolvimento histórico do programa de pesquisa Gaia, e as questões epistemológicas colocadas por ele, podem ser matéria-prima para estudos em história, sociologia e filosofia da ciência. Em particular, as implicações de Gaia para a compreensão do papel da vida na Terra, suas controvérsias epistemológicas (dentre as quais suas relações com a biologia evolutiva), sua história controvertida e suas implicações sócio-ambientais, são apenas alguns dos temas que, ao nosso ver, podem ser melhor explorados pela comunidade de história e filosofia da ciência do Brasil.

A estrutura do texto é a seguinte. Na segunda seção, oferecemos uma narrativa sobre o surgimento e desenvolvimento do programa de pesquisa Gaia. Na terceira seção,

³ *Ambiente* é uma palavra com muitas significações possíveis. Apesar de o conceito ter sido apropriado, de algum modo, pelas ciências naturais, ele transcende em muito as fronteiras destas, ganhando uma dimensão maior, à medida em que a ele podem ser associados os adjetivos social, cultural, etc. Uma abordagem rica da noção de ambiente, e que incorpora estes elementos é a de Enrique Leff (2006). Aqui, não temos como adotar a concepção de Leff, na medida em que estamos mais preocupados com os modos de relacionamento entre a vida e o seu ambiente físico-químico, apenas. Como não pretendemos dar conta de todas as dimensões do conceito, o utilizamos no sentido de “ambiente físico-químico”.

discutimos as relações de Gaia com outros movimentos culturais importantes das décadas de 1960 e 1970. Na quarta seção abordamos Gaia enquanto programa de pesquisa científico. Assim, discutimos definições de Gaia, seja em termos de um programa de pesquisa, seja como o sistema material proposto pelo programa. Na quinta seção, exploramos as relações entre o programa de pesquisa Gaia e a Ciência do Sistema Terra, um campo de pesquisas cada vez mais reconhecido, que tem recebido contribuições importantes das investigações empreendidas de uma perspectiva Gaiana. A sexta seção consiste na discussão de objeções de caráter epistemológico levantadas contra Gaia, as quais são importantes para a determinação de sua cientificidade. Na sétima seção, discorremos sobre um campo de pesquisas inteiramente novo, conhecido como “conexão algas-nuvens”, que evidencia o progresso teórico e empírico de Gaia, assim como suas contribuições para a construção da Ciência do Sistema Terra. A partir dos argumentos expostos nas seções anteriores, sustentamos, nas considerações finais, que Gaia, apesar de ainda suscitar controvérsias epistemológicas, coloca-se hoje como um programa de pesquisa científico progressivo. Neste sentido ele pode contribuir significativamente para um melhor entendimento de grandes mudanças planetárias, como a mudança climática em curso.

2. O surgimento e o desenvolvimento do programa de pesquisa Gaia

Gaia é uma das principais criações do inventor e cientista James Lovelock, nascido em 1919. Considerado uma das principais autoridades científicas da atualidade em mudanças climáticas (Andrew, 2007), ele é bem conhecido, além disso, por defender posições polêmicas, que frequentemente causam revolta entre alguns grupos ambientalistas. Por exemplo, em seu último livro, *A Vingança de Gaia* (“*The Revenge of Gaia*”), Lovelock defende fortemente que a energia nuclear deve ser usada imediatamente como substituinte aos combustíveis fósseis, enquanto alternativas energéticas mais eficientes e seguras não estiverem disponíveis (Lovelock, 2006a).

Lovelock formou-se em química, no ano de 1941, pela Universidade de Manchester, posteriormente doutorou-se em medicina pela Escola de Higiene e Medicina Tropical de

Londres (“London School of Hygiene and Tropical Medicine”) em 1948 e em biofísica pela Universidade de Londres, no ano de 1959 (Lovelock, 2006b). O contato com disciplinas tão distintas, a partir da década de 1940, rendeu-lhe habilidades importantes para sua formação científica e se mostrariam fundamentais para a articulação do seu programa de pesquisa.

O surgimento do programa de pesquisa Gaia está ligado a pesquisas empreendidas por Lovelock para a *NASA* (“American National Aeronautical and Space Administration”). Em 1961, Lovelock foi convidado pela *NASA* para projetar alguns instrumentos das sondas espaciais que a agência norte-americana enviaria ao espaço na sua primeira missão lunar instrumentada (Lovelock, [1988]1995, p. 1)⁴. Não há dúvida de que suas credenciais o qualificavam para o convite. Alguns dos instrumentos inventados por Lovelock, que solicitou mais de 40 patentes ao longo de sua carreira, foram adotados pela *NASA* em suas missões espaciais (Lovelock, 2006b).

Dentre as patentes de Lovelock, merece destaque um invento de 1957, o Detector de Captura de Elétrons (DCE). Trata-se de um pequeno aparelho, que cabe na palma da mão e permite a detecção de quantidades extremamente pequenas de substâncias poluentes, as quais jamais haviam sido detectadas antes de sua invenção e aplicação. A extrema sensibilidade do DCE confirmou a distribuição ubíqua de pesticidas e compostos químicos halogenados, ao nível de partes por trilhão (ppt), na atmosfera terrestre, no início dos anos 1960 (Lovelock, 2006b). Posteriormente, no início da década de 1970, e usando apenas o DCE, Lovelock fez as primeiras medições de CFCs (clorofluorcarbonos) na atmosfera terrestre (Lovelock, 1971a) e com isso, forneceu dados cruciais para a proposta do mecanismo de depleção da camada de ozônio, formulado por Molina & Rowland (1974), o qual rendeu-lhes o prêmio Nobel de química.

É importante notar que as informações inéditas geradas pelo uso do DCE contribuíram para o aumento da conscientização ambiental a partir da década de 1960. Os dados gerados a partir do uso do aparelho, por diversos cientistas em diferentes partes do planeta, serviram para dar credibilidade científica aos argumentos corretos, mas com pouca

⁴ Na padronização das referências utilizadas neste trabalho, o ano que está entre colchetes é o ano da primeira publicação e o ano que aparece em seguida é a data da edição utilizada, caso esta tenha sido reimpressa sem modificações. Nos casos das edições mais recentes que sofreram revisão ou expansão, indicamos apenas o ano dessa nova edição.

base empírica (Lovelock, 1981, p. 533) apresentados por Rachel Carson, em seu livro *Primavera Silenciosa* (Carson, [1962]2002; Wilson, [1962]2002; Kroll, 2006), o qual é considerado um dos marcos iniciais do movimento ambientalista moderno. O uso extensivo do DCE nos anos subseqüentes, acabou por mostrar, assim, as conseqüências sócio-ambientais adversas dos pesticidas. Neste sentido, o invento de Lovelock, foi de grande importância para o nascimento do ambientalismo moderno.

Uma vez contratado pela *NASA*, Lovelock se dedicou inicialmente a trabalhar na sonda lunar, mas logo em seguida foi transferido para o projeto de desenvolvimento de instrumentos sensíveis para as sondas Viking, os quais deveriam analisar as superfícies e as atmosferas dos planetas. Ali ele iniciou seu trabalho na Divisão de Biociências do Laboratório de Propulsão a Jato, situado na Califórnia, sendo que o objetivo do projeto no qual estava envolvido era investigar se outros planetas, especialmente Marte e Vênus, possuíam vida (Lovelock, 2001).

A corrida espacial, e os projetos de detecção de vida extraterrestre forjados em seu contexto desempenharam papel importante no surgimento do programa de pesquisa Gaia. Na avaliação de Margulis (2004), um das fontes históricas de Gaia é exatamente o grande sucesso dos programas espaciais internacionais que se iniciaram com o lançamento do *Sputnik* em 1957, pela União Soviética. A própria *NASA* fora criada um ano depois, em 1958, em grande medida para fazer frente à demonstração do poder soviético na exploração de outros planetas, naquele contexto, uma ameaça à hegemonia norte-americana.

Nesta época, Lovelock já sabia, por suas experiências prévias, o que significava ser cientista em tempos de guerra, se tivermos em conta que em 1941, logo após formar-se pela Universidade de Manchester, ele trabalhou no Instituto Nacional Britânico para Pesquisa Médica (“National Institute for Medical Research”, *NIMR*), em Londres. Como outras instituições científicas do país, o *NIMR* estava incumbido de realizar pesquisas de curto prazo em assuntos de aplicação imediata para a II Guerra Mundial. Dentre as pesquisas desenvolvidas, estavam a busca de medidas de pressão sanguínea que pudessem ser usadas sob a água e estudos sobre a difusão de infecções respiratórias na tripulação norte-americana de aviões de bombardeio, numa base militar britânica (Piqueras, 1998, p. 166).

Contudo, no período do pós-guerra, a função de Lovelock era diferente, mesmo que estivesse atuando na *NASA*, pelo menos parcialmente uma instituição científica a serviço da guerra fria. Nesta nova conjuntura, a ameaça de uma guerra nuclear parecia cada vez mais próxima, na medida em que o lançamento de um foguete ao espaço por norte-americanos ou soviéticos era, também, um teste para possíveis lançamentos de mísseis ou armas nucleares tendo como alvo o bloco adversário. As tecnologias para lançamento de foguetes ao espaço e as tecnologias militares envolvidas no lançamento de mísseis são, afinal, muito similares e tiveram seus desenvolvimentos estreitamente associados.

Neste contexto, a pesquisa empreendida por Lovelock na *NASA* resultou, em 1965, num pequeno e pouco conhecido artigo publicado na *Nature* (Lovelock, 1965). No artigo, intitulado “A physical basis for life detection experiments”, Lovelock discute e propõe métodos que poderiam ser aplicados para a detecção de vida extraterrestre, como avaliação do grau de redução da entropia no planeta, o desequilíbrio químico da atmosfera, entre outros. Mais tarde algumas das idéias presentes neste artigo seriam articuladas e integradas no que viria a ser conhecido como hipótese ou teoria Gaia⁵. Por esta razão, Margulis (2004) considera este ensaio o verdadeiro início do debate em torno de Gaia, o que nos parece, contudo, uma interpretação equivocada. Ainda que neste ensaio apareçam idéias e argumentos teóricos que mais tarde fariam parte do programa de pesquisa iniciado por

⁵ É comum, encontrar na literatura as expressões ‘hipótese Gaia’ e ‘teoria Gaia’. O próprio Lovelock usa a expressão ‘hipótese’ para referir-se ao construto ‘Gaia’ no início de sua história. De acordo com ele e outros autores (ver Lovelock, [1979]2000, 2001; Kirchner, 1989, 1993, 2003, pp. 21; Volk, 1998, p. 27; Margulis, 2004, pp. 8-9; Schneider et al., 2004, p. xiv) a ‘hipótese’ Gaia teria evoluído posteriormente para a ‘teoria’ Gaia. Subjacente a esta visão parece estar o pressuposto, equivocado, de que hipóteses se tornam teorias à medida que se acumulam evidências empíricas que as sustentam. Qualificamos esta visão como equivocada com base no entendimento de que teorias e hipóteses são formas distintas de conhecimento e uma não se transforma na outra. Uma teoria é um conjunto de proposições sobre o mundo empírico relacionadas de maneira sistemática, que cumpre o papel de explicar e prever fenômenos ou padrões observados na natureza, frequentemente mediante a elucidação de processos ou mecanismos responsáveis pela sua produção ou causação. Já uma hipótese, por sua vez, é uma explicação tentativa para um fenômeno ou padrão específico, que deve ser submetida a teste com base em previsões derivadas dela e, necessariamente, da teoria na qual está inserida, sem a qual a construção de um teste empírico não é realmente possível, na medida em que depende de condições iniciais, pressupostos metodológicos, conhecimentos sobre instrumentos e análises utilizadas etc. (cf. Lakatos [1970]1995, Laudan [1982]1998, Brandon, 1994). Como estamos empregando a teoria da ciência de Lakatos, temos usado sistematicamente desde o início do trabalho ‘programa de pesquisa Gaia’, por entendermos que foram desenvolvidas diferentes versões teóricas de Gaia ao longo de sua história, as quais se estruturam em torno de um núcleo de idéias centrais (cf. Lima-Tavares, 2003). Assim, restringiremos ao longo deste trabalho o uso da expressão ‘hipótese Gaia’ ou ‘teoria Gaia’ a citações de outros autores.

Lovelock, o termo ‘Gaia’ ainda não estava presente, nem havia – o que é muito mais importante – qualquer esboço de um sistema teórico articulado.

Ainda neste ano, Lovelock e a filósofa Dian Hitchcock publicaram dois artigos sobre detecção de vida planetária a partir da Terra, intitulados “Life detection by atmospheric analysis” (Hitchcock & Lovelock, 1967) e “Detecting planetary life from Earth” (Lovelock & Hitchcock, 1967). Nestas publicações, seguindo a mesma linha do artigo publicado em 1965 por Lovelock, eles apresentaram bases teórico-metodológicas para elaborar experimentos para a detecção de vida planetária que fossem suficientemente gerais, no sentido de que deveriam ser independentes do tipo particular de vida que existe na Terra.

Um dos testes elaborados por Lovelock e Hitchcock consistia em comparar a composição química das atmosferas de Marte, de Vênus e da Terra. A base teórica do teste era simples: se um planeta não apresentasse vida, a composição química de sua atmosfera seria determinada apenas por processos físicos e químicos e, desse modo, deveria estar próxima ao estado de equilíbrio químico. Em contraste, a atmosfera de um planeta com vida, apresentaria uma espécie de ‘assinatura’ química característica, uma combinação especial de gases que manteria sua atmosfera num estado de constante desequilíbrio químico. É isso, precisamente, o que se observa na atmosfera terrestre. A coexistência de gases oxidantes e redutores na atmosfera terrestre é uma situação bastante improvável. Tal estado de coisas deve-se à presença marcante de organismos vivos, que usam a atmosfera (assim como os oceanos, os solos etc.) como meio de transporte, fonte de matérias-primas e depósito para resíduos de seu metabolismo.

Analisando a composição química das atmosferas de Marte e Vênus, a partir de dados coletados por pesquisadores do Observatório de Pic de Midi na França (Lovelock [1990]2000, p. 80) Lovelock e Hitchcock chegaram à conclusão, desapontadora para alguns, de que nossos vizinhos no sistema solar não possuem vida. Os resultados indicaram que as atmosferas destes planetas são dominadas por dióxido de carbono (CO_2), numa proporção acima de 95%, e possuem pouco oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2), bem como nenhum metano (CH_4), o que é um indicativo de que elas estão num estado de equilíbrio químico⁶.

⁶ Como explicaremos mais à frente neste texto, recentemente detectou-se uma assinatura constante de metano em Marte, o que pode ser um indicativo de vida bacteriana naquele planeta (Atreya et al., 2007). Contudo,

Por sua vez, os dados da atmosfera terrestre apresentavam-lhes um quadro bastante diferente. O nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%) são os gases dominantes, enquanto o dióxido de carbono contribuía com apenas 0,03% ou 300 ppm⁷. Além destes compostos, a atmosfera terrestre possui vários outros gases, todos altamente reativos entre si. No entanto, curiosamente, esta situação de instabilidade ou desequilíbrio, contrariando todas as probabilidades, se mantém na atmosfera terrestre há um longo período de tempo. Isso leva à seguinte indagação: por que a atmosfera terrestre tem uma composição química tão singular, tão diferente daquela das atmosferas de Marte e Vênus? A resposta, de fato trivial (porém, com grandes implicações), reside no fato de que a Terra possui vida e que esta é capaz de transformar profundamente as condições físico-químicas do planeta. Trata-se de reconhecer o papel de direito da vida na Terra, a qual atuaria, conforme Vladimir Vernadsky ([1926]2007) - um importante pensador russo e precursor da compreensão sistêmica do planeta Terra - “como uma verdadeira força geológica”⁸.

A título de ilustração, imaginemos que toda a vida fosse eliminada do planeta Terra repentinamente. Nessa Terra hipotética, sem vida, sem os organismos para repor os gases atmosféricos, as moléculas dos gases que permanecessem na atmosfera iriam rapidamente reagir entre si, resultando com o tempo numa atmosfera com a composição química muito próxima à de Marte ou Vênus, ou seja, numa atmosfera em estado próximo ao equilíbrio

isso não afeta a base teórica do argumento de Lovelock e Hitchcock. Caso tivessem tal informação na época em que inferiram que Marte não possuía vida, é provável que sustentassem precisamente que tal assinatura de metano seria um indício de vida neste planeta.

⁷ Muito embora a concentração do CO₂ na atmosfera esteja aumentando rapidamente, devido sobretudo à queima de combustíveis fósseis e à destruição de florestas. De acordo com o relatório do Grupo de Trabalho I do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), publicado em fevereiro de 2007, a concentração de CO₂ na atmosfera em 2005 (o último ano medido) estava em 379 ppm e continua a subir. (ver IPCC, 2007)

⁸ Cabe aqui, apontar argumentos contrários à tese de Levit & Krumbein (2000) de que há “ausência de novidade da teoria Gaia, de J. Lovelock em relação à teoria da biosfera, de V. Vernadsky” (Levit & Krumbein, 2000, p. 133). De fato, Vernadsky defendeu uma posição original e sofisticada (assim como injustamente esquecida) sobre o papel da vida e das sociedades humanas na transformação do ambiente físico-químico, já nas primeiras décadas do século XX. Contudo, ainda que se possa perceber continuidades entre Vernadsky e Lovelock, há de fato, descontinuidades notáveis entre os dois autores, em grande medida por conta de suas inserções em diferentes contextos sócio-históricos. Estas descontinuidades dão suporte à originalidade das idéias de Lovelock. Este pôde se valer, para desenvolver sua teoria de aportes teóricos advindos da cibernética, de estudos sobre exploração espacial e detecção de vida extraterrestre (Lovelock, [1991]2000), o que possibilitou desenvolver em maior profundidade argumentos e levantar evidências a favor do poder transformador da vida sobre o ambiente físico-químico (Kump et al., 1999; Jacobson et al., 2000). Vernadsky, por sua vez, não teve acesso aos desenvolvimentos nestas áreas da ciência, já que ele viveu até 1945, e portanto não pôde valer-se do desenvolvimento da exploração espacial, das pesquisas em exobiologia e da emergência da cibernética, cujo conceito sofreu uma ressignificação profunda a partir da definição de Norbert Wiener, em 1948 (de Rosnay, 2000).

químico. A atmosfera da Terra atual é, portanto, um produto biológico, sendo constantemente construída e consumida pelos seres vivos.

Os estudos realizados na *NASA* conduziram Lovelock a uma série de questões teóricas, não apenas sobre Marte ou Vênus, mas sobre a vida na Terra. Uma conclusão obtida por Lovelock e Hitchcock – a de que Marte não possui vida (Lovelock [1990]2000, p. 80) – implicava que eram *desnecessários* os gastos com a missão espacial das sondas Viking, que mesmo assim foram enviadas a Marte em 1975. O pouso da primeira nave aconteceu em 1976, e posteriormente os dados coletados *in situ* confirmaram a previsão de Lovelock e Hitchcock realizada em 1967. As conseqüências da conclusão destes levaram, na época, inevitavelmente a um conflito entre Lovelock e seus superiores na *NASA*, conforme relata o próprio Lovelock (referindo-se a ele e Hitchcock):

Nós havíamos provado nosso método e o havíamos usado para mostrar que Marte, era, provavelmente, destituído de vida. Não é necessário dizer que esta notícia não foi bem recebida pelo nosso patrocinador, a *NASA* [...] Eles desejavam, ansiosamente, uma razão para ir a Marte. E que melhor razão do que encontrar vida lá? Muito pior: seria uma publicidade muito pouco interessante para a *NASA* afirmar que o trabalho que tinha subsidiado provava que havia vida na Terra. [...] não fiquei surpreso ao me ver logo desempregado. (Lovelock, [1990]2000, p. 81)

Também não nos causa surpresa notar que em obra sobre a história das missões a Marte entre 1958 e 1978, assinada por historiadores da própria *NASA*, Lovelock não seja citado em nenhuma parte (Ezzel & Ezzel, 1984). Trata-se de uma injustiça notável, na medida em que Lovelock realizou contribuições importantes para a nascente ciência da exobiologia e para o desenvolvimento de métodos de detecção de vida extraterrestre, amplamente utilizados pela própria *NASA* (Dick & Strick, 2005, p. 88).

Em 1966, já desligado da agência americana, Lovelock retorna à Inglaterra, onde continuam a intrigar-lhe as características singulares da Terra, como a manutenção constante da composição química atmosférica (Lovelock, [1990]2000). No ano seguinte, 1967 (ver Lovelock, 2001, p. xi), durante uma conversa com o escritor William Golding, Prêmio Nobel de Literatura e seu vizinho em Bowerchalke (Reino Unido), Lovelock

recebeu deste a sugestão de dar o nome da deusa Grega Gaia ao seu construto teórico (Lovelock, 2001, p. 3). Contudo, como discutiremos mais à frente, a escolha deste nome trouxe problemas para a aceitação do programa de pesquisa pela comunidade científica, pelo menos no início de sua história.

No ano seguinte, em 1968, Lovelock apresentou o que ele já chamava de “hipótese Gaia” em uma conferência sobre as origens da vida na Terra, em Princeton (Lovelock, 2001, p. 254). Além disso, em 1969, Lovelock publicou em parceria com C.E. Giffin, um artigo em *Advances in the Astronautical Sciences*, onde expõe suas idéias como base para o estabelecimento de uma ecologia planetária, o que se daria sobretudo através da análise da composição química das atmosferas dos planetas (Lovelock & Giffin, 1969). Aos poucos, ele se dava conta de que não apenas a composição atmosférica, mas também variáveis como a salinidade e o pH dos oceanos, a temperatura da superfície planetária, a concentração de nuvens, entre outros fatores geofísicos importantes, poderiam ser mantidos pelos seres vivos em estados adequados para sua própria sobrevivência. Começava a se articular uma visão teórica sobre a dinâmica planetária, na qual a vida desempenhava papel central. O movimento proposto por Lovelock, de fato, consistiu em inverter a visão tradicionalmente aceita, sobretudo na geologia, acerca do relacionamento da vida com o ambiente físico-químico (Lovelock, [1990]2000). As condições de habitabilidade do planeta – que são indicadas por suas características geofísicas singulares – não são, desta nova ótica, algo que antecede a existência da vida, como se o planeta fosse uma espécie de berço ideal para esta última. Ao contrário, elas foram e continuam a ser – de acordo com o novo olhar proposto por Lovelock – uma construção da vida e do ambiente físico-químico interrelacionados de maneira profunda. Para Schellnhuber (1999) esta mudança de foco proposta por Gaia e adotada posteriormente pela comunidade de pesquisas na Ciência do Sistema Terra constitui uma “segunda Revolução Copernicana” (Schellnhuber, 1999, p. 19). Como afirmou Lovelock, num artigo de 1971 intitulado “*Air pollution and climatic change*”⁹:

⁹ As citações de textos de Lovelock e de outros autores foram traduzidas para o português pelos autores do presente artigo, excluindo-se, obviamente, os casos em que os textos consultados já estavam em português. Apenas os textos originais em inglês dos quais Lovelock é o único ou um dos autores se encontram em notas, de modo que possam ser examinados pelos leitores.

Mas se apenas a química inorgânica importasse, agora todo o nitrogênio da Terra deveria estar no mar como sais marinhos de ácido nítrico, dado que, ao pH e à pressão parcial de oxigênio do ambiente atmosférico, o nitrogênio molecular espontaneamente se oxida em íons nitrato. O fato de que, mesmo após 4×10^9 anos, o ar ainda consista principalmente de nitrogênio confirma a extraordinária vitória dos processos biológicos sobre a química inorgânica e o equilíbrio termodinâmico. (Lovelock, 1971b, p. 403)¹⁰.

Uma apresentação mais conhecida da ‘hipótese Gaia’ ocorreu em 1972, através da publicação de uma carta de Lovelock no periódico *Atmospheric Environment*. Lovelock explica o objetivo de sua carta da seguinte maneira:

O propósito desta carta é sugerir que a vida, em um estágio inicial de sua evolução, adquiriu a capacidade de controlar o ambiente global para satisfazer suas necessidades e que esta capacidade persistiu e ainda é ativamente usada. (Lovelock, 1972, p 579)¹¹.

Na versão presente nesta carta de 1972, Lovelock expressa suas idéias ainda pouco amadurecidas acerca de Gaia. Em 1974, entretanto, podemos encontrá-las consideravelmente desenvolvidas, sobretudo após o estabelecimento de sua parceria com Margulis. Segundo Lovelock (2001, p. 258), por conta de seu amplo conhecimento biológico, Margulis teria “[...] colocado carne nos ossos desnudos de meu esqueleto de Gaia”¹². Lovelock e Margulis publicaram artigos onde desenvolvem suas idéias em torno de Gaia nos periódicos *Tellus* (Lovelock & Margulis, 1974a), *Icarus* (Margulis &

¹⁰ “But if inorganic chemistry alone mattered, by now all the Earth’s nitrogen should be in the sea as salts of nitric acid, for at the pH and oxygen partial pressure of the atmospheric environment, molecular nitrogen spontaneously oxidises to nitrate ion. That, even after 4×10^9 yr, the air still consists mainly of nitrogen acknowledges the overwhelming victory of biological processes over inorganic chemistry and equilibrium thermodynamics”.

¹¹ “The purpose of this letter is to suggest that life at an early stage of its evolution acquired the capacity to control the global environment to suit its needs and that this capacity has persisted and is still in active use. In this view the sum total of species is more than just a catalogue, ‘The biosphere’, and like other associations in biology is an entity with properties greater than the simple sum of its parts.”

¹² “[...] put flesh on the bare bones of my skeleton of Gaia”.

Lovelock, 1974) e *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* (Lovelock & Margulis, 1974b). Nestes artigos, eles propunham que os seres vivos têm a capacidade de alterar seu ambiente físico-químico de modo a manter variáveis físico-químicas ambientais em um nível adequado para si mesmos, através das alças de retroalimentação negativas e positivas, ao nível global.

Ao longo da década de 1970, o programa de pesquisa Gaia foi, em termos gerais, ignorado pela comunidade científica. Lovelock relata que teve artigos sobre Gaia recusados em revistas proeminentes, por conta da imagem negativa associada a suas idéias (ver Lovelock, 2001). Apesar disso, vale a pena lembrar que algumas previsões relacionadas ao programa de pesquisa Gaia já haviam sido propostas e apoiadas empiricamente nas décadas de 1960 e 1970, o que sugeria sua credibilidade enquanto um programa de pesquisa científico¹³.

Uma primeira previsão fora feita por Lovelock e Hitchcock em 1967, antes mesmo de o programa de pesquisa assentar sólidas bases teórico-metodológicas. Trata-se, como já apontamos acima, da previsão de que Marte (assim como Vênus) não possuía vida. Embora hoje volte a ser discutido se Marte não poderia possuir vida bacteriana em aquíferos subterrâneos, sobretudo a partir da descoberta de concentrações significativas de metano que são mantidas estavelmente em sua atmosfera (Atreya et al., 2007), a previsão de Lovelock e Hitchcock foi apoiada empiricamente, por meio dos dados coletados pelas sondas Viking em Marte, na segunda metade da década de 1970. Deve-se considerar, ainda, que à luz da descoberta recente de metano residente de modo estável na atmosfera, a previsão derivada de Gaia é, também, a de que este planeta deve possuir vida.

Outra evidência poderosa a favor de Gaia foi a descoberta em 1972 do papel de um composto – o sulfeto de dimetila (DMS) – no ciclo do enxofre, conforme previsto por Lovelock e colaboradores (1972). Este composto seria mais tarde visto como peça importante nos mecanismos de regulação do clima, também de modo consistente com previsões derivadas do programa de pesquisa Gaia, conforme veremos na seção 7 (ver também Lovelock et al., 1972; Charlson et al., 1987). Assim, apesar da rejeição inicial pela

¹³ Para uma análise da cientificidade de Gaia com base em seu progresso teórico e empírico, à luz da metodologia dos programas de pesquisa lakatosianos, ver Lima-Tavares (2003). Para mais argumentos a favor da cientificidade de Gaia, ver outros trabalhos de nosso grupo de pesquisa (Nunes Neto & El-Hani, 2006; Carmo et al., 2007, Guimarães et al., no prelo)

comunidade científica nos anos 1970, a sorte de Gaia começou a mudar de modo radical a partir da década de 1980, sobretudo por conta da proposta do modelo do mundo das margaridas (*Daisyworld*) por Watson e Lovelock¹⁴, em 1983, e da proposição da hipótese CLAW por Charlson e colaboradores em 1987.

3. Os múltiplos significados de Gaia

Por sua polissemia, a palavra ‘Gaia’ pode ser interpretada de diversas maneiras, a depender do contexto em que se dá sua interpretação. A semioticista Myrdene Anderson, a este respeito, observou que “Gaia é um signo vazio com capacidade quase infinita de significação” (*apud* Lovelock, 1990, p. 102). A este comentário, Lovelock acrescentou, um relato de como os significados associados a Gaia se multiplicaram a partir da inserção do programa de pesquisa em outras esferas da cultura humana além da ciência, em virtude de suas conotações filosóficas e políticas (Markoš 1995):

eu o assisti [o signo ‘Gaia’] sendo preenchido rapidamente, e principalmente com bobagem, como uma lata vazia deixada em uma rua londrina. No entanto, este é, seguramente, o destino de qualquer signo novo e nada tem a ver com a qualidade da ciência de Gaia. Eu ofereci ‘geofisiologia’ como um nome alternativo, mas até agora poucos aderiram a ele. (Lovelock, 1990, p. 102)¹⁵.

Como lembra Lovelock, ele ofereceu outros possíveis nomes para seu programa de pesquisa, ainda que o tenha feito alguns anos depois de vir usando ‘Gaia’ (Lovelock, 1986, 1988). A motivação para estas propostas foi exatamente a má recepção de suas idéias pela comunidade científica, em grande parte por conta do nome que lhe fora atribuído. Lovelock sugeriu, a partir da segunda metade da década de 1980, substituir Gaia por ‘geofisiologia’ (ver Kirchner, 1989, pp. 224, 230; Lovelock, 1986, 1988, 2001; Lima-Tavares, 2003), mas ele próprio pensava que Gaia era um nome adequado para seu programa de pesquisa: “Ela

¹⁴ Para explicações sobre o modelo do Mundo das Margaridas ver outros trabalhos de nosso grupo de pesquisa como Lima-Tavares (2003) e Guimarães (2007).

¹⁵ “I watch it filling fast, and mostly with rubbish, like an empty skip left on a London street. Surely, though, this is the fate of any new sign and has nothing to do with the quality of the science of Gaia. I have offered ‘geophysiology’ as an alternative name, but so far there have been few takers.”

[Gaia] era uma palavra de quatro letras e impediria, assim, a criação de acrônimos bárbaros, como Sistema de Homeostase/Tendência Biocibernética Universal” (Lovelock, [1979]2000, p. 10)¹⁶. De qualquer modo, o termo ‘Gaia’ se estabeleceu como nome do programa de pesquisa, ao passo que geofisiologia é raramente usado.

Freqüentemente ‘Gaia’ é interpretada apenas, ou sobretudo, como sinônimo da deusa da mitologia grega (Hesíodo, 2006), como costuma ocorrer no âmbito do pensamento da Nova Era (ver, por exemplo, Nicholson & Rosen, 1997; Badiner, 1990; Sahtouris, 2000). Contudo, os pressupostos metafísicos subjacentes à mitologia grega ou ao pensamento da Nova Era não são geralmente compatíveis com o discurso científico, pelo menos na forma naturalista que este último assumiu desde meados do século XIX. Como assinala Crispin Tickell, no prefácio de *A Vingança de Gaia*: “No início, alguns viajantes da Nova Era embarcaram e alguns cientistas normalmente sensatos caíram fora” (Tickell, 2006, p. 12).

Não se pode perder de vista que Gaia surgiu numa época em que manifestações sócio-culturais, como o movimento hippie e o pensamento espiritualista, exerciam grande influência. Reivindicações do movimento hippie, como a desobediência civil, e um retorno a um estilo de vida mais próximo à natureza – em grande medida, uma influência do pensamento de Henry David Thoreau ([1854]2003) – encontravam solo fértil nas afirmações metafóricas e ainda imprecisas de Lovelock sobre a Terra. Numa época em que as religiões tradicionais estavam fragilizadas e começava a nascer uma maior conscientização sobre os problemas ambientais, muitos representantes do movimento hippie e do pensamento espiritualista, viam Gaia como uma “religião” atraente (Tickell, 2004). Abria-se assim, o caminho para que certas afirmações de Lovelock, sem amparo na comunidade científica, pudessem ser interpretadas dentro de um quadro místico¹⁷.

¹⁶ “It [Gaia] was a four-lettered word and would thus forestall the creation of barbarous acronyms, such as Biocybernetic Universal System Tendency/Homeostasis”.

¹⁷ Todavia, a relação entre o pensamento e o discurso de Lovelock com os grupos espiritualistas e da Nova Era, não é uma questão trivial. Possivelmente a aceitação entusiástica das idéias e do discurso de Lovelock por tais grupos sociais, não seja apenas uma apropriação do discurso deste cientista. Talvez tenha havido, e ainda haja em certa medida, um interesse de Lovelock em manter uma audiência cativa, ainda mais se tivermos em conta que suas idéias sobre Gaia foram sistematicamente rejeitadas pela comunidade científica, nas décadas de 1960 e 1970. Neste sentido, se Lovelock pretendia deliberadamente ter grupos espiritualistas como sua platéia ou se isso foi apenas uma consequência indesejável (para ele) da propalação de certas afirmações irrefletidas, como a de que a “Terra é um superorganismo”, não temos como dizer aqui. Entretanto, esta parece ser uma interessante questão para uma pesquisa futura, para a qual poderia contribuir um estudo da biografia de Lovelock e do contexto sócio-cultural no qual ele viveu. Para uma abordagem mais rica das condições histórico-culturais deste período sugerimos ao leitor a consulta de Hobsbawm (1995).

As associações entre Gaia e estes movimentos, portanto, levantaram suspeitas acerca do estatuto epistemológico do programa de pesquisa, provocando na comunidade científica uma rejeição cada vez maior a ela. A desconfiança se apoiava, em parte, na crença muito forte de que Gaia oferecia uma visão mística do mundo, ao mesmo tempo em que tentava travestir-se de ciência¹⁸. Naquele contexto, Gaia foi acusada de ser pseudociência, até mesmo um movimento anticientífico, ou apenas uma metáfora infalsificável (ver Postgate, 1988; Kirchner, 1989).

4. Gaia enquanto movimento científico

Stephen Jay Gould afirmou em 1987 durante uma palestra na Universidade do Estado de Nova York que “A Hipótese Gaia não diz nada de novo – ela não oferece novos mecanismos. Ela apenas muda a metáfora. Mas metáfora não é mecanismo” (*apud* Abram, 1993, p. 66). Gould, contudo, perde de vista dois pontos importantes. Em primeiro lugar, a palavra “mecanismo” é ela própria uma metáfora, como bem aponta Abram (1993). E trata-se de uma importante metáfora, de fato, uma que representou bem o sucesso da ciência moderna, sobretudo a partir de Descartes, que escreveu em 1644: “Eu tenho descrito a terra, e todo o mundo visível, como se ele fosse uma máquina” (*apud* Abram, 1993). Em segundo lugar, Gould comete um engano ao afirmar que Gaia não propõe mecanismos novos (este ponto, todavia, será abordado em detalhes na seção 7).

O julgamento sobre o estatuto epistemológico de uma teoria ou programa de pesquisa não deve se apoiar majoritariamente no nome que lhe é dado. Gaia é apenas uma metáfora para um sistema material, do mesmo modo que o ‘gene egoísta’ de Richard Dawkins ([1976]2007) é uma metáfora para um fragmento de DNA. Como aponta um importante biogeoquímico contemporâneo, Tyler Volk (1998, p. 4): “Eu uso Gaia como um lembrete para pensar ‘global’ e para pensar ‘sistema’”. Entretanto, esta não é a posição usual. A concepção que muitos pesquisadores mantêm de Gaia é de que este propõe que a Terra é um grande organismo vivo. E apenas isso. Mas, é preciso dizer, esta é uma interpretação equivocada, que não leva em consideração o desenvolvimento do programa

¹⁸ Vale a pena levar em consideração, ainda, que esta era uma manobra que já vinha sendo tentada por outros movimentos, como, por exemplo, os criacionistas norte-americanos (ver, p. ex., Pigliucci, 2002).

de pesquisa iniciado por Lovelock. Tal interpretação toma como central algo que é secundário, ou até mesmo, supérfluo.

Analisar corretamente uma teoria ou um programa de pesquisa é analisar seu conteúdo, sua coerência interna e com o resto do conhecimento estabelecido, seu sucesso empírico etc. O programa de pesquisa Gaia, apesar de ainda suscitar importantes debates na comunidade científica, não deixa de assumir os princípios ontológicos, epistemológicos e metodológicos mais básicos que guiam a ciência contemporânea. Evidência para esta afirmação pode ser encontrada no próprio fato de Gaia hoje compor parte do conhecimento científico bem estabelecido sobre a Terra, como afirma Lovelock (2004, p. 1): “O que nós não parecemos ter notado é que a ciência de Gaia é agora parte do conhecimento convencional e é chamada de ciência do Sistema Terra; apenas o nome Gaia é controverso.”¹⁹. Na próxima seção, quando tratarmos da relação entre Gaia e a Ciência do Sistema Terra, apresentaremos argumentos que consubstanciam esta afirmação.

Voltemo-nos agora à definição do sistema físico descrito pelo programa de pesquisa, Gaia. Este foi inicialmente concebido por Lovelock como sinônimo de biosfera, o conjunto de todos os seres vivos do planeta. Entretanto, ele abandonou posteriormente esta concepção inicial. No novo prefácio, *datado de 2000*, do seu primeiro livro, *Gaia: um novo olhar sobre a vida na Terra* (“*Gaia: a new look at life on Earth*”), Lovelock se pronuncia da seguinte forma acerca de seu entendimento anterior do sistema descrito por seu programa de pesquisa:

Agora, vinte e seis anos depois, eu a conheço melhor [Gaia] e vejo que, neste primeiro livro, eu cometi erros. Alguns foram sérios, tal como a idéia de que a Terra era mantida confortável por e para os seus habitantes, os organismos vivos. Eu não consegui deixar claro que não era a biosfera sozinha que fazia a regulação, mas a coisa toda, a vida, o ar, os oceanos e as rochas. Toda a superfície da Terra,

¹⁹ “What we do not seem to have noticed is that the science of Gaia is now part of conventional wisdom and is called Earth system science; only the name Gaia is controversial”

incluindo a vida, é uma entidade auto-reguladora e isso é o que eu chamo de Gaia. (Lovelock, [1979]2000, p. ix)²⁰.

De fato, Gaia, tal como foi apresentada inicialmente por Lovelock (em 1968 e 1972) e posteriormente, por Lovelock e Margulis no ano de 1974, em três publicações distintas (Lovelock & Margulis, 1974a, 1974b; Margulis & Lovelock, 1974) apresentava importantes lacunas e imprecisões. Naturalmente, esta situação não é exclusiva do programa iniciado por Lovelock, mas é compartilhada com qualquer outro programa de pesquisa em seu estágio inicial de desenvolvimento. Programas de pesquisa não nascem prontos, mas são construídos ao longo de uma história complexa, resultado de diálogo e crítica no interior da comunidade científica, e em alguma medida de discussões sócio-culturais mais amplas, que se dão entre as comunidades científicas e outros grupos culturais.

Inicialmente, Lovelock e Margulis sustentavam a concepção de que a vida no planeta era a única responsável pela auto-regulação planetária (Lovelock [1979]2000). Porém, este foi um equívoco reconhecido pelo próprio Lovelock conforme evidencia sua citação acima. A auto-regulação é, assim, uma propriedade do sistema vida e ambiente físico-químico, e não apenas uma propriedade da vida no planeta. A partir desta constatação, Lovelock passou a dar mais importância aos componentes abióticos do sistema Terra, como oceanos, atmosfera e as rochas, na produção da auto-regulação do sistema global. Como aponta Lima-Tavares (2003), esta foi uma das principais mudanças estruturais ocorridas no programa de pesquisa Gaia na década de 1980.

Porém, mesmo após anunciar esta mudança de concepção, Lovelock não define o sistema Gaia de uma única maneira. Esta imprecisão na explicação do que seria Gaia está presente em várias outras passagens da obra de Lovelock, inclusive no mesmo texto, datado de 2000, onde ele declara ter entendido melhor a natureza do sistema Gaia. Se na citação anterior Lovelock considera que Gaia corresponde à superfície da Terra, portanto um sistema contido na Terra, em outras duas passagens do mesmo prefácio ele se compromete com a idéia de que Gaia é a própria Terra: “A idéia da Terra como um organismo vivo, algo

²⁰ “Now twenty-six years on, I know her better and see that in this first book I made mistakes. Some were serious, such as the idea that the Earth was kept comfortable by and for its inhabitants, the living organisms. I failed to make clear that it was not the biosphere alone that did the regulating but the whole thing, life, the air, the ocean, and the rocks. The entire surface of the Earth including life is a self-regulating entity and this is what I mean Gaia”.

capaz de regular seu clima e composição [...]” (Lovelock, [1979]2000, p. xv)²¹ e “A noção de Gaia, de uma Terra viva” [...] (Lovelock, [1979]2000, p. xviii)²².

Assim, mesmo após reconhecer que Gaia não inclui apenas a biosfera, mas também outras partes do planeta, Lovelock ainda não deixa claro se esta entidade é parte da Terra, excluindo assim o interior do planeta, ou se ela é o próprio planeta, como um todo. Tal ambigüidade serviu como motivação para que outros pesquisadores buscassem descrever o sistema Gaia de maneira mais rigorosa. Apoiando-se em uma das maneiras usadas por Lovelock para descrever Gaia, Volk (1998) a entende como “o sistema de interações da vida, solo, atmosfera e oceano” (Volk, 1998, p. xiii). Em outra passagem de seu livro, Volk, usando metáforas, situa Gaia como um sistema entre *Hélio* (o Sol e o espaço circundante) e *Vulcão* (as camadas interiores da Terra). Gaia, do ponto de vista de Volk, estaria contida no sistema Terra, já que estariam fora de seus limites todas as camadas internas do planeta (que ele denomina *Vulcão*). Ele também exclui dos limites de Gaia a crosta litosférica.

Lenton e van Oijen (2002) propõem uma caracterização ainda mais precisa de Gaia. Eles discutem a descrição oferecida por Volk (1998) e uma outra, fornecida por Lovelock ([1991]2000), para, em seguida, caracterizar Gaia como

um sistema termodinamicamente aberto na superfície da Terra, compreendendo a vida (a biota), a atmosfera, a hidrosfera (oceano, geleiras e água doce), matéria orgânica morta, os solos, sedimentos e aquela parte da litosfera (crosta) que interage com os processos de superfície (incluindo rochas sedimentares e rochas sujeitas a intemperismo). (Lenton e van Oijen, 2002, p. 684).

O limite superior do sistema Gaia, de acordo com Lenton e van Oijen (2002), é o topo da atmosfera, em contato com o espaço exterior. O limite inferior, de acordo com eles, é mais difícil de definir. Porém, pode ser interpretado como sendo dependente da escala de tempo dos processos sob consideração. Assim,

²¹ “The idea of the Earth as a living organism, something able to regulate its climate and composition [...]”

²² “The notion of Gaia, of a living Earth [...]”

para escalas de tempo maiores do que a reciclagem da crosta (cerca de 10^8 anos), a linha pode ser traçada entre a crosta e o manto. Para processos que podem aproximar-se de estados de equilíbrio dinâmico [*steady state*] rapidamente (em menos de 10^3 anos), a superfície externa da crosta pode ser considerada o limite do sistema. (Lenton & van Oijen, 2002, p. 684).

Lenton e van Oijen criticam a caracterização de Gaia por Volk (1998), considerando que ela se mostra inadequada por excluir do sistema quaisquer componentes da crosta, que, como se sabe, são parte também dos processos de auto-regulação sugeridos pelo programa de pesquisa. Diferentemente, a descrição de Lovelock ([1991]2000), em que Gaia é apresentada como sinônimo de Terra, é demasiadamente inclusiva. Ela inclui as camadas mais interiores do planeta, que, apesar de influenciarem os sistemas da superfície, não são significativamente influenciadas por estes e, assim, devem ser colocadas fora do sistema.

Lenton e van Oijen (2002) fazem duas distinções importantes. Em primeiro lugar, Gaia não é o mesmo que ‘Sistema Terra’ (uma expressão muito usada atualmente), porque este último inclui estados anteriores à origem da vida, enquanto Gaia se refere apenas ao sistema com vida abundante. Além disso, o sistema Terra também inclui o interior do planeta, algo que está excluído de Gaia. A segunda distinção, que foi também feita por Lovelock, é entre Gaia e biosfera. Esta última é definida por Odum (1988, p. 3) como o sistema de “todos os organismos vivos da Terra que interagem com o ambiente físico-químico como um todo”. Portanto, os limites de Gaia são maiores do que a biosfera, já que Gaia inclui outras partes além dos seres vivos. Enquanto o limite superior da biosfera se localiza a pouco mais de 50 km sobre a superfície terrestre, onde foguetes russos já coletaram fungos e bactérias (Lenton e van Oijen 2002), a exosfera (parte da atmosfera e, portanto, parte de Gaia) se estende até cerca de 10.000 km acima da superfície, quando entra em contato com o espaço interplanetário.

Em suma, a definição de Lenton e van Oijen (2002) situa Gaia como um sistema espaço-temporalmente contido no sistema Terra. Assumiremos daqui em diante a caracterização do sistema Gaia oferecida por estes autores, com exceção dos momentos em

que estivermos nos referindo especificamente às descrições de Gaia fornecidas por Lovelock.

5. Gaia e a Ciência do Sistema Terra

A expressão ‘Ciência do Sistema Terra’ (do inglês “Earth System Science”, doravante CST) tem se tornado cada vez mais popular nos últimos anos nas comunidades de cientistas que se dedicam ao estudo da Terra, sobretudo entre climatologistas, meteorologistas, geofísicos e geoquímicos (Johnson et al., 1997; Kump et al, 1999; Jacobson et al., 2000; Lenton & van Oijen, 2002). Para uma compreensão mais rica do estatuto epistemológico do programa de pesquisa Gaia na comunidade científica, é importante discutir, pois, como Gaia e a CST se relacionam.

O uso do termo ‘Gaia’ certamente não foi a única, mas tem sido uma importante fonte de problemas, para a apreciação do programa de pesquisa no âmbito científico, como já apontamos. Havia, e ainda há de certo modo, uma tensão entre o nome do programa de pesquisa (que sugere um caráter pseudocientífico) e seu conteúdo propriamente dito, que se mostra teoricamente consistente, inovador, com potencial de gerar avanços científicos, manifestos nas previsões novas derivadas dele, algumas delas com significativo apoio empírico (Schneider et al, 2004). Esta tensão acabou por fazer com que idéias relacionadas ao programa Gaia fossem usadas sem que o devido crédito a ele e aos seus proponentes fosse assumido. Margulis (2004), em trabalho sugestivamente intitulado “Gaia com qualquer outro nome” (*Gaia by Any Other Name*), afirma que a

Astrobiologia é o campo da história natural reinventado para ser financiável para uma ampla variedade de cientistas, ao passo que ‘Ciência do Sistema Terra’ não é nada mais do que a própria Gaia vestida em roupas futurísticas e tornada palatável para cientistas ‘hard rock’, especialmente geofísicos. (Margulis, 2004, p. 8).

O ambientalista britânico Crispin Tickell parece concordar com as palavras de Margulis e apresenta uma análise que evidencia bem a imagem que muitos cientistas ainda têm de Gaia:

O que reside num nome? Eu recordo uma conversa com um cientista famoso ávido para lançar ao lixo ‘todo este *nonsense* sobre Gaia’. Quando eu protestei e propus renomeá-la ‘geofisiologia’, ‘ciência do sistema Terra’, ou algo similar, ele se animou e terminou por confessar que ‘a maioria dela deve estar correta’. A escolha da deusa grega Gaia, em vez de algum polissílabo científico derivado do Grego, ou algum acrônimo pior, foi um risco. Por um lado, era atrativo demais para aqueles em busca de uma nova religião, num tempo em que as religiões tradicionais estavam colapsando; por outro, era repulsivo demais para aqueles que gostam de ocultar sua ciência sob um vocabulário em código. (Tickell, 2004, p. 223-4).

Logo em seguida, Tickell faz referência à Declaração de Amsterdam sobre Mudança Global, assinada por quase mil pessoas em 13 de julho de 2001. Esta declaração foi assinada por pesquisadores de quatro grandes programas internacionais de pesquisa científica (“International Biosphere-Geosphere”, “International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change”, “World Climate Research Programme” e “International Biodiversity Programme”) que lidam diretamente com mudanças climáticas e seus impactos sociais, o que evidencia a sua importância. A Declaração enunciou que

[O] Sistema Terra se comporta como um sistema auto-regulatório único, formado por componentes físicos, químicos, biológicos e humanos. As interações e retroalimentações entre as partes componentes são complexas e exibem variabilidade temporal e espacial em múltiplas escalas. (Moore III et al, 2001, p. 1).

Podemos perceber, assim, que em alguns casos o conteúdo do programa de pesquisa proposto por Lovelock tem sido usado pela comunidade científica, chegando a fazer parte

do conhecimento científico convencional, ainda que Lovelock ou Gaia não recebam os créditos. Com relação a este mesmo trecho, Lovelock se pergunta: “Eu imagino quantos daqueles que assinaram a declaração sabiam que estavam colocando seus nomes num enunciado da teoria Gaia” (Lovelock, 2004, p. 1)²³.

Entretanto, Lovelock não está totalmente relegado ao descrédito, como sua reclamação poderia fazer-nos crer, à primeira vista. Aqui, apenas a título de ilustração, selecionamos dois exemplos de livros-texto dedicados a pesquisadores, professores e estudantes da CST: “O sistema Terra” (“The Earth System”) de Kump et al (1999) e “Ciência do Sistema Terra – dos ciclos biogeoquímicos às mudanças globais” (“Earth System Science - from biogeochemical cycles to global change”) de Jacobson et al (2000). Em ambos encontramos referências a Lovelock e a Gaia (ver Kump et al, 1999, p. 19 e Jacobson et al, 2000, p. 12-13). Em Kump et al (1999), o segundo capítulo intitulado “Daisyworld: an introduction to systems” apresenta o Mundo das Margaridas, modelo matemático desenvolvido por Watson e Lovelock (1983) como modelo-padrão da abordagem sistêmica advogada pela CST. Em Jacobson e colaboradores (2000) notamos que no capítulo introdutório do livro, dos 17 trabalhos citados, 5 são trabalhos nos quais Lovelock é pelo menos um dos autores. Ainda nesta obra, o principal proponente do programa de pesquisa Gaia é colocado ao lado de personagens como Svante Arrhenius e Vladimir Vernadsky, como uma grande influência na construção da visão da Terra que se estabelece com a CST (Jacobson et al., 2000):

A tarefa de integrar as esferas e os ciclos biogeoquímicos emerge como um desafio necessário, ainda que intimidador. A ciência disciplinar tem oferecido poucos precedentes para nós, embora orientação substancial tenha sido oferecida por pioneiros como Arrhenius, Vernadsky e Lovelock, os quais pressagiaram estes desenvolvimentos globais. (Jacobson et al, 2000, p. 10).

Em outra passagem do mesmo capítulo, Jacobson et al. (2000, p. 4) se referem à integração das várias esferas do planeta, que resulta em “um sistema Terra que é complexo,

²³ “I wonder how many of those who signed the declaration knew that they were putting their names to a statement of Gaia theory”.

acoplado e em evolução”. É interessante notar a similaridade desta declaração com algo que Lovelock disse em 1990: “Gaia é a teoria de um sistema em evolução — um sistema composto dos organismos vivos da Terra e de seu ambiente material, as duas partes sendo intimamente acopladas e indivisíveis”. (Lovelock, 1990, p. 100)²⁴. Trechos como estes podem ilustrar a profunda influência de Gaia sobre o desenvolvimento da CST.

Entretanto, apesar das reclamações de Lovelock, Margulis e Tickell, e das razões apontadas por eles, é preciso tomar suas acusações de apropriação do conteúdo do programa de pesquisa Gaia, sem referência ou crédito, com cautela. Embora isso não signifique que não haja, em alguns casos, uma apropriação do conteúdo de Gaia desacompanhada de uma referência explícita ao programa de pesquisa Gaia ou a Lovelock e seus colaboradores (Johnson et al, 1997; Moorcroft, 2006. Ver Margulis, 2004 e Tickell, 2004, para críticas a esta situação), este não é o caso, por exemplo, do livros editados por Kump et al (1999) e Jacobson et al. (2000), que atribuem grande importância a Lovelock e Gaia na construção da CST.

A relação entre o programa de pesquisa Gaia e a CST pode ser vista, contudo, sob outro ângulo. Se assumirmos que as duas empreitadas científicas não tem exatamente os mesmos objetivos, podemos enxergar com mais clareza a relação entre elas. Gaia oferece uma visão mais estreita do sistema Terra, exigindo um maior número de compromissos teórico-metodológicos de seus partidários, do que a CST, que é um campo de pesquisas comprometido com pressupostos mais amplos. As investigações em CST abarcam um leque maior de possibilidades teóricas do que permite a adoção de um programa de pesquisa específico. Por exemplo, é uma reivindicação de Gaia que retroalimentações negativas sejam mais frequentes do que retroalimentações positivas ao nível global, na medida em que ela propõe mecanismos de auto-regulação planetários (ver por exemplo, Kirchner, 1989, p. 224). A CST não se compromete com exigências de tal especificidade²⁵.

²⁴ “Gaia is the theory of an evolving system — a system made from the living organisms of the Earth, and from their material environment, the two parts being tightly coupled and indivisible”.

²⁵ Estas considerações nos sugerem que as relações entre Gaia e CST podem ser abordadas com proveito a partir de uma perspectiva desenvolvida por Scheiner & Willig (2008). Para estes autores, que estão voltados para a síntese de uma teoria geral em ecologia, “o termo ‘teoria’ é usado em referência a uma variedade de tipos de sistemas em diferentes níveis de especificidade. Além disso, a natureza da teoria difere em cada um dos níveis.” (Scheiner & Willig, 2008, p. 22). Com base nisso, eles reconhecem três níveis nos quais podemos falar em teoria. No nível mais amplo, estão as “teorias gerais”, que consistem de “um domínio inteiro da ciência e uma série de princípios fundamentais” (Scheiner & Willig, 2008, p. 22). Uma teoria geral, para os autores, não faz previsões específicas, mas oferece uma estrutura (*scaffolding*) para a integração e a reunião

Esta visão acerca do relacionamento entre Gaia e CST parece estar de acordo com uma sugestão do físico e filósofo James Kirchner, um dos principais críticos do programa de pesquisa proposto por Lovelock. De acordo com ele “Os proponentes de Gaia fizeram um grande trabalho ao defenderem a necessidade de considerar a Terra como um sistema acoplado” (Kirchner 2002, p. 404). Em uma publicação posterior, Kirchner sugere que o futuro do programa de pesquisa iniciado por Lovelock exigirá que os “partidários de Gaia se integrem à comunidade mais ampla da ciência do sistema Terra e abandonem a noção de que Gaia está à parte de (ou talvez até mesmo em oposição a) aquele esforço mais amplo” (Kirchner, 2003, p. 38). Ele oferece, inclusive, algumas sugestões para o futuro de Gaia, “na esperança de que ele possa desempenhar um papel produtivo no desenvolvimento futuro da ciência do sistema Terra” (Kirchner, 2003, p. 38).

De fato, o esforço dos cientistas envolvidos com a CST – muitos dos quais também fazem pesquisa sobre Gaia – como Timothy Lenton, Robert Charlson, Lee Kump, Axel Kleidon, entre outros – parece mais amplo, se lembrarmos, conforme esboçamos acima, da distinção entre o sistema Gaia e o sistema Terra (ver acima a discussão de Lenton e van Oijen, 2002, sobre a definição de Gaia).

Em suma, apesar de hoje o programa de pesquisa Gaia e a CST qualificarem-se como empreitadas distintas, não podemos perder de vista que o programa de Lovelock desempenhou e tem desempenhado um papel importante no surgimento e desenvolvimento da CST.

de “teorias constituintes”. Estas representam o segundo nível em que eles compreendem teoria. Uma “teoria constituinte” fixa fronteiras e parâmetros de interesse particular, que guiam o desenvolvimento de modelos. Mais importante para eles, é o fato de que, uma teoria constituinte deve unificar em si uma série de modelos interrelacionados. E por fim, no nível mais específico, estão os modelos, instanciações de teorias constituintes. Neste nível, as predições são formalizadas e o entendimento das relações causais é o que o motiva o próprio processo de pesquisa. Portanto, em suma, a teoria geral é composta por teorias constituintes, ao passo que uma teoria constituinte é composta por modelos. Apenas especulativamente, propomos que esta hierarquia de aninhamento pode ser aplicada às relações entre CST e Gaia. Precisamos ressaltar, contudo, que não é esta a perspectiva que adotamos neste trabalho, na medida em que ela contradiria a nossa concepção de Gaia como um programa de pesquisa Lakatosiano, portanto uma série de teorias. Porém, apenas apontamos para esta possibilidade que pode orientar os primeiros passos de uma pesquisa futura, detalhada, sobre o assunto. A partir do quadro apresentado por Scheiner & Willig, CST seria uma teoria geral, Gaia poderia ser considerada uma teoria constituinte da CST, e o *Daisyworld* assim como também o mecanismo proposto pela hipótese CLAW (ver adiante) poderiam ser considerados os modelos da teoria constituinte Gaia. Nos parece, em princípio, que Gaia seria a única teoria constituinte da CST, muito embora esta seja uma questão a ser investigada.

6. Questões epistemológicas suscitadas por Gaia

Nesta seção, apresentamos e discutimos algumas questões epistemológicas importantes relacionadas ao programa de pesquisa Gaia. Em primeiro lugar, discutiremos a atribuição de vida ao sistema Gaia (ou à Terra), a qual freqüentemente é vista como o conteúdo central do programa de pesquisa. Em seguida, trataremos do uso de uma linguagem teleológica e funcional por Lovelock, a qual rendeu importantes críticas a Gaia. Por fim, abordaremos a questão de se os mecanismos de auto-regulação propostos pelo programa de pesquisa Gaia podem ser conciliados com a evolução biológica, tal como esta é descrita pela teoria sintética da evolução.

6.1. Atribuição de vida a Gaia (ou à Terra)

Em alguns casos as acusações de que Gaia é pseudociência não são de todo incompreensíveis, pois Lovelock de fato propalou e continua a propalar afirmações controversas, como é o caso – principalmente – de sua insistência na idéia de que o sistema Gaia (ou à Terra)²⁶ deve ser visto como um organismo vivo. Em primeiro lugar, contudo, precisamos deixar claro que a crítica a estas afirmações controversas de Lovelock não é necessariamente uma crítica ao programa de pesquisa Gaia, como pretendemos mostrar abaixo. Tal crítica não põe em xeque o valor da ciência produzida pelo programa de pesquisa Gaia, na medida em que não se dirige ao que consideramos ser a proposta mais central do mesmo, atingindo apenas uma idéia que, em nosso entendimento, pode ser tratada como secundária.

Ofereceremos a seguir algumas razões para sustentar nossa tese de que afirmações de Lovelock que atribuem vida ao sistema Gaia não são centrais ao programa de pesquisa e podem ser, inclusive, abandonadas. No lugar destas proposições, sugeriremos fortemente

²⁶ Como informamos acima, Lovelock, apesar de distinguir Gaia de biosfera (que seria, de acordo com ele, a parte viva de Gaia), não distingue claramente entre Gaia e o planeta Terra. Conforme argumentamos na seção 4, Gaia é um sistema da Terra, que, apesar de não corresponder ao planeta completamente, representa-o de modo muito significativo, porque compreende a hidrosfera, a atmosfera, a vida e parte da litosfera (*cf.* definição de Lenton e van Oijen acima). Assim, apenas para evitar a repetição desta ressalva em outras passagens desta seção, usaremos apenas ‘Gaia’ quando estivermos tratando de afirmações de Lovelock que atribuem vida a Gaia ou à Terra.

que a ênfase seja colocada sobre a proposição de que há na Terra um sistema cibernético de controle, constituído pela biota e pelo ambiente físico-químico estreitamente interrelacionados por alças de retroalimentação negativas e positivas.

Estudos histórico-filosóficos prévios realizados em nosso grupo de pesquisa (ver Lima-Tavares & El-Hani, 2001; Lima-Tavares, 2003; Nunes Neto, 2005; Nunes Neto & El-Hani, 2006; Guimarães et al., no prelo) indicam que há razões para suportar a tese de que a noção de que Gaia é viva – defendida por Lovelock – não é central ao programa de pesquisa. Nestes estudos, tomamos como base a teoria da ciência de Lakatos ([1970]1995), afirmando, assim, que tal tese não deve fazer parte do núcleo duro do programa de pesquisa Gaia, que incorpora ao longo de seu desenvolvimento pelo menos duas versões teóricas (*cf.* análise de Lima-Tavares, 2003).

Para Lakatos, uma proposição faz parte do núcleo duro de um programa de pesquisa por decisão metodológica dos cientistas que aderem a ele. A decisão de estipular um núcleo duro, irredutível, é o que Lakatos ([1970]1995) denominou ‘heurística negativa’ de um programa. As proposições que compõem este núcleo duro, são, portanto, infalsificáveis por decisão metodológica dos proponentes do programa de pesquisa. Como as proposições do núcleo duro são consideradas infalsificáveis, um cientista que rejeite uma proposição do núcleo duro de certo programa de pesquisa estará automaticamente, para Lakatos ([1970]1995), abandonando este programa e assumindo outro. Neste sentido, a aceitação de um programa de pesquisa reflete, em suma, a assunção das proposições infalsificáveis do núcleo duro do programa em questão. De modo inverso, se um cientista rejeita uma ou mais proposições do núcleo duro de um programa, automaticamente ele está decidindo mudar de programa.

É importante notar que as conclusões estabelecidas por Lakatos como normas refletem casos bem sucedidos na história da ciência. Em outros termos, suas recomendações normativas são derivadas de uma análise histórica, descritiva. Assim, partindo de análises de descrições históricas, Lakatos estabelece como norma que quaisquer tentativas de falsificar uma proposição do núcleo duro devem ser redirecionadas para proposições do cinturão protetor, as quais podem e devem ser alteradas ao longo do

desenvolvimento do programa, diferentemente do conteúdo do núcleo duro (Lakatos [1970]1995; Lima-Tavares, 2003).

Pelo exposto, pode parecer estranho nosso argumento de que uma tese defendida com grande veemência pelo principal proponente de um programa de pesquisa não seja central a ele. No entanto, em primeiro lugar, devemos notar que haveria um problema na reconstrução racional do programa de pesquisa fundado por Lovelock se a proposição de que Gaia é viva fosse incluída no núcleo duro do mesmo. Como vimos, o núcleo duro de um programa de pesquisa não pode ser refutado ou modificado, em virtude da heurística negativa do programa. Contudo, a idéia de que Gaia é um ser vivo vem sofrendo modificações significativas ao longo da história do programa de pesquisa. Embora Lovelock tenha insistido durante as décadas de 1960 e 1970 na idéia de uma Terra viva, desde meados da década de 1980, ele tem oscilado entre esta afirmação – que encontramos inclusive em seu último livro (Lovelock, 2006a) – e a idéia de que Gaia é quase-viva (Lovelock, 1985, 1986, [1991]2000). Esta última idéia representa um recuo de Lovelock frente às críticas – sobretudo às dos biólogos darwinistas – que foram dirigidas contra sua afirmação de que Gaia é um ser vivo. Isto sugere, de qualquer modo, que sua afirmação de que Gaia é viva não pode ser entendida como uma proposição do núcleo duro do programa, na medida em que foi alterada pelo próprio Lovelock. Tal afirmação é melhor compreendida como uma proposição metafísica acessória, situada no cinturão protetor (Lakatos[1970]1995, p. 51), visto que são estas proposições, e não as nucleares, que podem ser modificadas, substituídas ou mesmo removidas do programa de pesquisa, se necessário. A proposição de que Gaia é um sistema cibernético de controle envolvendo a biota e o ambiente físico-químico, por sua vez, não foi modificada ao longo do desenvolvimento histórico do programa de pesquisa, o que sugere seu papel central neste, como defendemos.

Outra razão importante para considerar que tais afirmações de Lovelock não são tão centrais quanto parecem à primeira vista, está no fato de que a grande maioria dos pesquisadores que adere ao programa de pesquisa não defende a idéia de atribuir vida ao sistema Gaia (Volk, 1998; Kleidon, 2002; Lenton, 2002; Lenton & van Oijen, 2002), sendo que alguns, inclusive criticam abertamente esta idéia (Margulis, 1997; Wilkinson, 1999). A própria Margulis, uma das principais colaboradoras de Lovelock na construção do programa de pesquisa, comentou há alguns anos: “Eu rejeito a afirmação de Jim ‘A Terra é

viva'; [...] Eu não concordo com a formulação que diz 'Gaia é um organismo'" (Margulis, 1997, p. 54). Wilkinson (1999), também um teórico importante ligado ao programa de pesquisa, comenta que, embora esteja presente em muitos escritos de Lovelock e possa ser também encontrada em trabalhos recentes de outros autores, a formulação de Gaia como um programa de pesquisa sobre um 'superorganismo' capaz de agir de modo a otimizar as condições para a vida na Terra não é apoiada por muitos cientistas que fazem pesquisa baseada em Gaia. Este autor assume a mesma posição que tomamos neste artigo, argumentando que a compreensão mais aceita de Gaia entre os cientistas atribui à vida um efeito regulatório significativo sobre o ambiente físico-químico global, através de alças de retroalimentação que constituem o sistema material Gaia, sendo evitadas as idéias de superorganismo e de uma otimização das condições físico-químicas do planeta.

Freqüentemente, Lovelock se defende das críticas dirigidas à sua idéia de que Gaia é viva lembrando aos críticos que tais afirmações têm apenas um estatuto metafórico. Porém, como nota Kirchner, há um sério risco embutido nisso, visto que

a percepção comum é a de que Gaia significa que 'a Terra é viva' ou que a biosfera está tentando fazer uma boa casa para si própria aqui. Porque muitas pessoas não compreendem os riscos de tratar afirmações poéticas como proposições científicas, o público em geral pensa que os cientistas estão ocupados tentando compreender se a Terra *realmente* é 'viva'. (Kirchner, 1993, p. 46, ênfase no original).

O comentário de Kirchner mostra ainda o risco de diluição das fronteiras entre um discurso científico e outros tipos de discurso que tais declarações controversas de Lovelock suscitam. Ou como notou Markoš (1995), Gaia espalha-se para outras esferas da cultura humana, além da ciência. Isso pode trazer, inclusive, problemas para a compreensão da natureza da ciência, seja entre o público em geral ou no contexto mais restrito do ensino de ciências, por exemplo.

Por fim, não são as proposições que enunciam que Gaia é (ou comporta-se como) um organismo vivo que levam às previsões bem sucedidas do programa de pesquisa e, portanto, ao seu conteúdo empírico excedente, mas sim uma outra tese que é compartilhada

pelos cientistas envolvidos com Gaia (e também pelo próprio Lovelock). Trata-se, ao nosso ver, da afirmação de que existe no planeta Terra um sistema cibernético de controle que inclui a biota e o ambiente físico-químico, intimamente associados através de inúmeras alças de retroalimentação negativas e positivas, que levam à auto-regulação de variáveis globais importantes, como a temperatura planetária, a composição química da atmosfera, entre outras, como propriedades emergentes do sistema.

6.2. Uso de explicações teleológicas ou funcionais

Críticas importantes aos fundamentos do programa de pesquisa Gaia foram feitas por Kirchner, entre o fim da década de 1980 e início dos anos 1990 (Kirchner, 1989, 1990, 1993). Nestes trabalhos, Kirchner critica duramente Gaia, acusando-a de pseudociência, e, assim, colocando em xeque sua cientificidade. Kirchner (1989) propõe que Gaia não é uma ‘hipótese’ única, mas trata-se, antes, de uma série de ‘hipóteses’ distintas. Em trabalho posterior, Kirchner (1993), apresenta uma taxonomia ligeiramente diferente, e atribui diferentes graus de força às hipóteses Gaia. Aqui, nós combinaremos as listas de Kirchner de modo a dar conta de todas as hipóteses por ele elencadas, nos dois trabalhos. As hipóteses Gaia apontadas por Kirchner (1989, 1993) com seus respectivos significados de acordo com o próprio Kirchner (e exemplos de onde aparecem nas obras de Lovelock, Margulis e colaboradores), estão listadas a seguir:

- (i) Gaia influenciadora: “a biota tem uma influência substancial sobre certos aspectos do mundo abiótico, tais como temperatura e composição química da atmosfera”. (Kirchner, 1993, p. 38; ver Sagan & Margulis, 1983, *apud* Kirchner, 1993).
- (ii) Gaia Geofisiológica: “a biosfera pode ser comparada a um imenso organismo vivo, o qual, como outros organismos, pode exibir tanto homeostase quanto comportamento instável”. (Kirchner, 1989, p. 224; Lovelock, 1986, pp. 12, 19, *apud* Kirchner, 1989).

- (iii) Gaia Coevolutiva: “a biota influencia o ambiente abiótico e que o ambiente, por sua vez, influencia a evolução da biota por processos darwinistas” (Kirchner, 1993, p. 38).
- (iv) Gaia Homeostática: “a biota influencia o mundo abiótico de um modo que é estabilizador. As ligações preponderantes entre a biota e o mundo físico são alças de retroalimentação negativa” (Kirchner, 1989, p. 224)
- (v) Gaia Teleológica: “a atmosfera é mantida em homeostase não apenas pela biosfera, mas por e para (em algum sentido) a biosfera” (Kirchner, 1993, p. 38; Lovelock & Margulis, 1974a)
- (vi) Gaia Otimizadora: “a biota manipula seu ambiente físico-químico com o propósito de criar, condições biologicamente favoráveis, ou até ótimas, para si mesmas” (Kirchner, 1993, p. 38; Lovelock & Margulis, 1974b)

Estas hipóteses, de acordo com Kirchner, estão alinhadas num gradiente de força crescente que vai de (i) a (vi). Kirchner agrupa as três primeiras sob o rótulo de “hipóteses fracas”, as quais, segundo ele, nada propõem de novo, mas apenas enunciam algo que já é parte do conhecimento científico estabelecido. Não nos parece, contudo, que Kirchner esteja correto em sua apreciação, na medida em que o que ele denomina Gaia Coevolutiva não é, no nosso entendimento, tão destituída de originalidade. Esta ‘hipótese’ desempenha, inclusive, papel importante no sucesso das previsões realizadas por Lovelock e seus colaboradores, assim como oferece as bases heurísticas para a formulação de hipóteses testáveis sobre os sistemas ecológicos da Terra (ver seção 5, na qual discorremos sobre a hipótese CLAW). Devemos notar ainda, em apoio a nossa defesa da originalidade de Gaia Coevolutiva, que o reconhecimento de relações dialéticas entre organismos e ambiente físico-químico é, ela própria, uma novidade conceitual importante na biologia evolutiva (ver Lewontin, 1985, 2002; Odling-Smee et al., 2003).

Para Kirchner (1993), o conteúdo verdadeiramente novo do programa de pesquisa Gaia está no que ele denomina ‘hipóteses’ fortes, que são as hipóteses (iv), (v) e (vi). Estas hipóteses, se analisadas separadamente ou em conjunto, colocam uma série de questões sobre o estatuto epistemológico de Gaia. Por exemplo, “Gaia Homeostática”, propõe um mecanismo de controle capaz de manter o sistema Gaia em homeostase. Entretanto, se a

vida estabiliza ou desestabiliza o ambiente físico-químico ao seu redor é uma questão extremamente debatida contemporaneamente (Kleidon, 2002; Volk, 2002, 2003; Kirchner, 2002, 2003; Lovelock, 2003). Gaia Teleológica conecta-se a esta última hipótese, pois ela, de acordo com Kirchner, especifica o objetivo ou propósito do mecanismo de controle, que seria a manutenção das condições de habitabilidade para os seres vivos. Entretanto, ainda assim não temos clareza sobre quais são os objetivos. Estes precisam ser definidos de maneira clara. Afinal, sem objetivos ou propósitos definidos de maneira independente, Gaia Teleológica simplesmente afirma que Gaia cumpre o propósito de fazer qualquer coisa que ela faça. Em outros termos, caso não se defina rigorosamente o propósito ou o conjunto de propósitos do mecanismo de controle postulado por Gaia, o construto teórico, se mostrará infalsificável. Conseqüentemente, caso utilizemos – como faz Kirchner (1989, p. 226) - o critério de demarcação assumido por Popper ([1959]1974)²⁷, isso significará que as proposições de Gaia não podem ser consideradas científicas.

O problema colocado por Gaia Teleológica é, segundo Kirchner, respondido por “Gaia Otimizadora”. De acordo com ela, o propósito do mecanismo de controle em questão é a manutenção de um estado ótimo para o sistema Gaia, considerado em sua totalidade. Kirchner (1989, 1993) coloca, então, um problema difícil para Gaia Otimizadora: Como definir uma condição ótima para toda a biosfera? Afinal, a biosfera inclui uma enorme diversidade de organismos, cada um com requisitos diferentes, e muitas vezes conflitantes, para sua sobrevivência. A título de exemplo, basta considerarmos os requisitos bastante diferenciados para a sobrevivência de organismos aeróbios, que dependem crucialmente do gás oxigênio, e anaeróbios obrigatórios, que são levados à morte por este composto (Lima-Tavares & El-Hani, 2001).

“Gaia Otimizadora” não é uma hipótese bem vinda na comunidade científica, contemporaneamente. De fato, ela propõe uma tese difícil de sustentar diante das evidências empíricas sobre as relações entre a vida e o ambiente físico-químico, e também de argumentos teóricos (Wilkison, 1999; Kleidon, 2002). Kleidon (2002), por exemplo, sugere que dentre as hipóteses nulas possíveis, temos razões suficientes para rejeitar

²⁷ Popper formulou seu critério de demarcação no contexto de sua teoria da ciência, o falsificacionismo. De acordo com Chalmers (1995, p. 66), para o falsificacionismo, “uma proposição é científica, se ela é falsificável, isto é, se existe uma proposição de observação ou um conjunto delas logicamente possíveis que são inconsistentes com ela, isto é, que, se estabelecidas como verdadeiras, falsificariam a hipótese.” Para maiores detalhes, ver Popper ([1959]1974) e Chalmers (1995).

completamente “Gaia Otimizadora”, e não considerá-la como uma das hipóteses merecedoras de teste²⁸.

Mais recentemente, Kirchner tem modificado sua opinião sobre o estatuto de Gaia, como podemos ver em trabalhos publicados nos últimos anos (Kirchner, 2002, 2003). Este movimento pode ser compreendido se notarmos que, desde fins da década de 1980, o programa de pesquisa Gaia vem apresentando um desenvolvimento cada vez mais vigoroso, explicando fenômenos do funcionamento do sistema Gaia (e em alguma medida, do próprio sistema Terra) e oferecendo previsões bem-sucedidas.

Entretanto, a análise de Kirchner a respeito da importância das explicações teleológicas para o programa de pesquisa Gaia aponta para a necessidade de um tratamento sistemático do problema, especialmente no contexto da linguagem utilizada por Lovelock em suas publicações. Em primeiro lugar, notemos que Lovelock de fato explica teleologicamente os fenômenos no contexto de Gaia. Por exemplo, ele afirma que “a atmosfera da Terra é mais do que meramente anômala; ela parece ser um dispositivo constituído especificamente para um conjunto de propósitos” (Lovelock & Margulis, 1974, p. 3). Como notamos no trecho acima, Lovelock atribui propósitos à atmosfera, o que constitui um uso da linguagem teleológica. Além disso, é importante notar, Lovelock recorre com frequência e ao longo de toda a sua obra a uma linguagem teleológica através do uso, em seus trabalhos sobre Gaia, de expressões como “objetivo”, “propósito”, “finalidade”, “função”, entre outros (para maiores detalhes, ver Nunes Neto, 2005 e Nunes Neto & El-Hani, 2006). Porém, a despeito da alta frequência de uso das explicações teleológicas, em outras passagens de sua obra, Lovelock nega que esteja comprometido com uma linguagem teleológica: “Em nenhuma parte de nossos escritos, nós expressamos a idéia de que a auto-regulação planetária tem um propósito, ou envolve previsão ou planejamento pela biota” (Lovelock, 1990, p. 100).

Em diversas outras passagens de sua obra Lovelock lança mão também de atribuições funcionais, como nesta passagem de 1990:

‘Qual a função de cada gás no ar?’ Fora do contexto de Gaia, essa pergunta seria considerada redundante e ilógica, mas dentro deste contexto não será mais ilógica

²⁸ Concordamos com Kleidon com relação a este ponto. Para maiores detalhes, ver Nunes Neto (2005).

do que a pergunta: ‘Qual é a função da hemoglobina ou da insulina no sangue?’ Temos postulado um sistema cibernético; portanto, é razoável indagar a função das partes componentes. (Lovelock, [1990]2000, p. 84).

Dedicamos trabalhos anteriores à exploração de alguns caminhos para a abordagem das explicações teleológicas ou funcionais no programa de pesquisa Gaia (Nunes Neto, 2005; Nunes Neto & El-Hani, 2006, 2008), a partir da perspectiva de teorias sobre teleologia e função presentes na filosofia da biologia. Este empreendimento, acreditamos, pode lançar novas luzes sobre o problema colocado por Kirchner, e como consequência, o tratamento destas questões será importante para uma avaliação mais consistente do estatuto epistemológico do programa Gaia.

No momento, estamos articulando um modelo funcional para o programa de pesquisa Gaia, com base na teoria sobre funções do filósofo Robert Cummins (ver Cummins, [1975]1998; 1983, 2002). Aqui, por razões de espaço e dos objetivos deste artigo, limitamo-nos a apontar o problema. Em um outro artigo, incluído nesta dissertação (capítulo 3), dedicamo-nos inteiramente à aplicação da análise funcional a Gaia. Para maiores detalhes ver Nunes Neto (2005) e Nunes Neto & El-Hani (2006, 2008).

6.3. Gaia e seleção natural

As relações entre Gaia e a teoria da seleção natural têm sido bastante investigadas, de várias perspectivas (Dawkins, 1982; Watson e Lovelock, 1983; Hamilton e Lenton, 1998; Wilkinson, 1999; Lenton, 1998, 2004).

A recepção de Gaia pelos biólogos evolutivos colocou em pauta um problema relevante, relacionado ao modo e ao nível de atuação da seleção natural. Uma das idéias centrais da teoria darwinista da evolução é que são populações de organismos que evoluem, e não organismos individuais. Portanto, a analogia entre a Terra ou o sistema Gaia e os organismos individuais, no contexto dos argumentos de Lovelock, deveria levar à suposição, do ponto de vista do darwinismo, de que deveria haver uma população de ‘Terras’ ou sistemas Gaia evoluindo por seleção natural. Mas não conhecemos outros

planetas que exibam vida como a Terra. Nem a Terra nem o sistema Gaia parecem ser parte, portanto, de uma população capaz de evoluir. Este problema foi chamado por W. F. Doolittle (Barlow & Volk, 1992) de problema da “população de um”. Trata-se de uma dificuldade importante, que aponta para a existência de mais desanalogias do que analogias entre a Terra ou o sistema Gaia e os organismos típicos (Nunes Neto, 2005): Ou a Terra/sistema Gaia não evolui, visto que constitui uma população de um único indivíduo e não há variação disponível para ser selecionada (Barlow & Volk, 1992; Volk, 1998), ou, caso evolua, deve fazê-lo por um processo distinto da evolução biológica, de natureza transformacional, i.e. no qual uma entidade individual sofre transformações ao longo de sua existência, e não variacional, no qual a evolução ocorre em populações de entidades variantes (Lewontin, 1985).

Dawkins (1982) criticou Gaia, também de uma perspectiva darwinista, com base na idéia de que não haveria meios de a evolução por seleção natural levar a um altruísmo em escala global, tal como proposto por Lovelock ([1979]2000). Esta crítica levou à construção do modelo do mundo das margaridas (*Daisyworld*) por Watson e Lovelock (1983), que tem pavimentado um caminho para desenvolvimentos interessantes, bem como tem criado um fértil debate nos últimos anos. Este debate tem como um de seus temas centrais, precisamente, as maneiras como poderiam ser compatibilizados o programa de pesquisa Gaia e as teorias contemporâneas sobre a evolução biológica²⁹. O problema apontado por Dawkins está relacionado à questão do nível de organização em que atua a seleção natural, de modo a resultar em mudanças evolutivas. Mesmo em níveis menos elevados de organização do que o sistema Gaia, como o de espécie, é controverso se há seleção, ou, alternativamente, se a seleção é suficientemente intensa para produzir resultados evolutivos.

As discussões sobre a seleção de espécies são relevantes neste contexto, porque deixam claras as dificuldades para postular processos seletivos ocorrendo ao nível da Terra ou do sistema Gaia como um todo. Sobre a seleção de espécies, Meyer e El-Hani comentam:

²⁹ Este não é o espaço para estendermos o tratamento deste debate, visto que isso nos afastaria do foco de nosso trabalho de investigação. Remetemos o leitor, assim, a fontes originais, como Robertson & Robinson (1998), Lenton (1998), Lenton & Lovelock (2000, 2001).

A principal crítica à seleção de espécies vem da observação que a seleção é muito eficaz quando olhamos dentro de uma espécie [...]. Isso significa que, para que a seleção atuando sobre espécies fosse capaz de explicar a diversidade do mundo natural, ela teria de ser suficientemente intensa, de modo a superar a eficácia da seleção atuando no nível dos organismos individuais. Esse problema se torna ainda maior porque o número de espécies disponíveis para serem triadas é menor do que o de indivíduos dentro de uma população, e o maior número de indivíduos disponíveis para a triagem torna o processo de seleção mais eficaz; afinal, como há relativamente poucas espécies para serem selecionadas, aumenta a chance de que aquela que sobrevive seja somente a espécie mais 'sortuda', e não uma espécie 'melhor'. (Meyer & El-Hani, 2005, pp. 93-94).

O reconhecimento de que o acaso também é um fator importante no processo evolutivo nos leva à idéia de que a sobrevivência diferencial pode ser resultado também de acidentes, e não somente de variações nas características dos organismos. Esses acidentes tendem, como argumentam Meyer e El-Hani, a ser mais freqüentes na seleção de espécies, resultando em dificuldades para a postulação de tal mecanismo, ou, pelo menos, para que este mecanismo, caso ocorra, se mostre eficaz, de modo a influenciar realmente o processo evolutivo.

Se a seleção de espécies é algo amplamente controverso, podemos conceber dificuldades ainda maiores para a atuação da seleção natural em níveis superiores de organização. O papel do acaso numa população unitária seria ainda maior do que o papel deste na seleção de espécies, na medida em que o número de sistemas Gaia é significativamente menor do que o número de espécies conhecidas.

Quando combinados, o problema da população de um, apontado por Doolittle, e a questão relacionada de como a seleção natural poderia atuar em níveis tão altos de organização tornam evidente a dificuldade, ou até mesmo a impossibilidade, de postular a evolução do sistema Gaia por processos darwinianos (*cf.* Volk, 1998).

Outro aspecto a considerar é que somente indivíduos darwinianos evoluem por seleção natural. De acordo com Gould (2002, pp. 71, 597-613), organismos não são as únicas entidades biológicas que exibem as propriedades necessárias para a atribuição de

individualidade darwiniana. Essas propriedades incluem, de acordo com Gould, critérios como pontos de nascimento e morte definidos, estabilidade suficiente durante o tempo de vida, existência de contornos definidores de uma entidade, produção de prole e herança de características parentais pela prole. Espécies podem ser caracterizadas, com base nestes critérios, como indivíduos darwinianos. Mas é evidente que Gaia não pode ser assim concebida, de acordo com tais critérios. Embora cumpra os três primeiros critérios, Gaia não satisfaz os dois últimos, visto que não se reproduz e, conseqüentemente, não pode haver qualquer tipo de herança de características por uma suposta progênie³⁰. No fundo, esta é outra maneira de apresentar o mesmo problema apontado por Doolittle: não pode haver evolução em uma população unitária.

Apesar destas dificuldades, uma abordagem interessante das relações entre Gaia e seleção natural foi apresentada por Lenton em 2004. Este autor observa de maneira precisa que a crítica de muitos biólogos evolutivos e ecólogos a Gaia perdem de foco um ponto central, a saber, o de que a regulação postulada pelo programa de pesquisa Gaia não precisa surgir como um resultado da seleção natural (Lenton, 2004). De acordo com ele,

Sim, o funcionamento do sistema Terra (que inclui a vida) deve ser consistente com a seleção natural que ocorre dentro dele, mas não, isso não significa que a auto-regulação em escala planetária tem de ser produto da seleção natural. (Lenton, 2004, p. 15).

De acordo com o raciocínio de Lenton, a seleção natural pode dar origem a certo tipo de regulação. Porém, há outro tipo de regulação do sistema Terra que não emerge a

³⁰ Em resposta a este ponto Lovelock introduz as analogias entre Gaia (ou a Terra) com colméias de abelhas (*beehives*) e bactérias. A analogia com as colméias de abelhas cumpriria o papel de mostrar que Gaia pode ser considerada pelo menos uma entidade quase-viva, conforme sugere a seguinte afirmação de Lovelock: “Talvez os neo-darwinistas possam aceitar ‘quase-vivo’ como uma categoria para Gaia e para ecossistemas, colméias de abelhas, e outros sistemas que contém organismos e exibem auto-regulação” (Lovelock, [1991]2000, p. 31). Por sua vez, a analogia com as bactérias foi construída por Lovelock em resposta às críticas dos biólogos evolutivos, de que a Terra não pode ser considerada viva por não possuir a capacidade de reprodução, uma característica fundamental para uma abordagem neo-Darwinista da vida (ver Lima-Tavares, 2001 e Carmo et al, no prelo). Lovelock ([1991]2000) reivindica que, muito embora não sejam capazes de comportamentos propositais e não “façam amor” as bactérias são consideradas vivas. Assim, ele infere que, como na sua visão, compartilha estas características com as bactérias, a Terra também pode ser considerada viva. Porém, Lovelock ([1991]2000) perde de vista que o argumento dos biólogos evolutivos não faz referência à reprodução sexuada, mas sim à reprodução em geral (sexuada ou assexuada). E bactérias, diferentemente da Terra, se reproduzem (assexuadamente).

partir da seleção natural, o que é o mesmo que dizer que, apesar de a seleção natural poder ser suficiente para a auto-regulação, ela não é uma condição necessária para tal. O fato de buscarmos estabelecer a consistência de Gaia com o pensamento evolutivo atual, sobretudo com a ação da seleção natural, não significa que o acordo tenha de ser construído através do estabelecimento de uma relação causal entre seleção natural e auto-regulação das variáveis ambientais a um nível global. Ou, dito de outra maneira, não significa que a auto-regulação de Gaia tenha sido causada pela seleção natural atuando ao nível de uma parte do sistema (as populações biológicas). Como afirma Lenton, em seguida,

A suposição implícita, mas falsa, é que a regulação biótica só pode surgir de características que tenham evoluído por seleção natural, baseada em suas conseqüências ambientais. Em outras palavras, a regulação deve ser selecionada [*selected for*]. Não se reconhece, assim, que a regulação é uma propriedade emergente em muitos sistemas nos quais não há seleção ativa a favor da regulação [...]. De fato, muitas (e talvez a maioria das) retroalimentações bióticas globalmente importantes parecem ser baseadas em produtos colaterais da seleção – por exemplo, aqueles gerados pela produção de sulfeto de dimetila [DMS] [...]. Isso pode levar a um tipo de regulação diferente daquele do modelo do mundo das margaridas original, com o ambiente sendo mantido num estado limitante, que, por sua vez, pode ser notavelmente resistente e resiliente à mudança. (Lenton, 2004, pp. 20-21)

Aqui, Lenton se aproxima de uma idéia exposta por Volk (1998, 2004), para o qual “Gaia é a Vida em um mundo de produtos colaterais” (“Gaia is Life in a wasteworld of by-products”). Para estes autores, a auto-regulação seria, então, muito mais um sub-produto da interação entre organismos e seu ambiente físico-químico do que um objetivo do sistema Gaia.

Lenton (2004, p. 21) explica que esta regulação ocorre porque o aumento da frequência dos traços organísmicos que alteram o ambiente físico-químico é, em última instância, sujeito a restrições. O aumento da frequência de um traço particular é restringido se ele altera uma variável ambiental de modo que reduza a taxa de crescimento populacional dos organismos que o possuem. Ele nota ainda que os não-portadores do traço

são igualmente afetados, o que indica que o efeito ambiental não é seletivo. Mas o que interessa, realmente, é que, embora o traço continue sendo favorecido por seleção, a retroalimentação negativa sobre o crescimento (o aumento da frequência do traço) ainda ocorre. A retroalimentação positiva sobre o crescimento também pode ocorrer, quando o aumento da frequência de um traço particular altera uma variável ambiental que, por sua vez, aumenta a taxa de crescimento dos organismos portadores do traço (juntamente com os não-portadores). Se o efeito do traço no ambiente físico-químico é suficientemente forte, e há uma resposta máxima do crescimento à variável ambiental, então o regime de retroalimentação positiva será alterado e o sistema se estabilizará em um regime de retroalimentação negativa, com a variável ambiental em um estado limitante.

De acordo com Lenton (2004), este tipo de retroalimentação está envolvido na regulação de dois importantes componentes da atmosfera terrestre: oxigênio (num limite superior) e dióxido de carbono (num limite inferior). Vejamos o caso do oxigênio, o qual tem permanecido dentro de limites relativamente estreitos, constituindo entre 15 e 25 % da atmosfera, pelos últimos 350 milhões de anos. Um grande número de mecanismos de retroalimentação negativa tem sido imaginados para explicar esta estabilidade (Lenton e Watson, 2000), todos os quais envolvem processos cujos efeitos no oxigênio atmosférico são um efeito colateral (*by-product*) da seleção baseada em outras pressões seletivas, mais localizadas, de curto prazo.

Um destes processos é o aumento da fonte de fósforo a partir da amplificação biológica do intemperismo das rochas. Isso fornece um nutriente essencial ao organismo responsável por este processo. Em última instância, conforme Lenton,

o aumento no intemperismo do fósforo leva a uma produtividade aumentada na terra e no oceano e, conseqüentemente, a um maior enterramento do carbono orgânico, o qual gera uma correspondente fonte líquida de oxigênio atmosférico. (Lenton, 2004, p. 21).

Entretanto, é importante notar, seguindo a Lenton (2004), que o aumento da frequência dos traços (“*spread of traits*”) que elevam (“*driving up*”) o oxigênio atmosférico

está sujeito a restrições. Em particular, o processo de combustão da matéria orgânica é sensível à taxa de mistura e pressão parcial do oxigênio. Se o oxigênio aumenta acima de sua taxa de mistura e/ou pressão parcial, a energia necessária para a ignição decresce, a taxa de queima aumenta, e assim a frequência de incêndios também aumenta. Isso tende a reduzir a biomassa e causar mudanças ecológicas que levam de florestas a ecossistemas de regeneração mais rápida (como por exemplo, o processo de savanização de uma floresta tropical). Isso, por sua vez, suprime o intemperismo do fósforo, tendendo a diminuir a fonte de oxigênio, o que gera uma retroalimentação negativa. A termodinâmica da combustão da matéria orgânica propicia, assim, um ponto de ajuste (*set point*) para a regulação do oxigênio. Este ponto variará em alguma medida com a umidade do clima (conteúdo de mistura do combustível), mas ele não está sujeito à adaptação biológica, porque a evolução não pode burlar as leis da termodinâmica.

Em suma, o que o exemplo nos mostra é que a regulação não precisa ser um objetivo da evolução, mas, em alguns casos importantes, resulta de efeitos colaterais, ou seja, de sub-produtos do processo evolutivo. Este argumento oferece caminhos interessantes para o desenvolvimento futuro do programa de pesquisa Gaia, pois não busca conciliar a evolução biológica com a regulação de variáveis planetárias importantes, a partir do estabelecimento de nexos causais diretos entre estes processos. Ao invés disso, sua proposta consiste em tratar o sistema Gaia como um sistema complexo adaptativo, cujas propriedades emergentes não são um objetivo da evolução por seleção natural. Desta ótica não nos comprometemos com o problema da população de um, apontado por Doolittle. Esta perspectiva parece apontar no mesmo sentido em que temos orientado nossas investigações, a saber no caminho de construir um modelo funcional para Gaia apoiando-nos nas idéias de Cummins ([1975]1998).

De qualquer modo, a fim de estabelecer solidamente as bases do programa de pesquisa Gaia, muito trabalho ainda está por ser feito, inclusive sobre as relações entre Gaia e o darwinismo contemporâneo, ou, de modo mais restrito, entre Gaia e seleção natural. Muitos debates sobre esta e outras questões epistemológicas relativas a Gaia estão em curso, suscitando desenvolvimentos interessantes e importantes, não apenas para o programa de pesquisa iniciado por Lovelock, mas também para a ecologia e para a biologia evolutiva (Free & Barton, 2007).

7. Sobre algas e nuvens

Nesta seção, examinaremos um dos episódios nos quais o programa de pesquisa Gaia gerou previsões novas e pelo menos a confirmação de uma destas previsões, respectivamente progresso teórico e progresso empírico (*cf.* Lakatos [1970]1995; para maiores detalhes, ver Lima-Tavares, 2003). Ressaltamos que o nosso tratamento deste episódio histórico tem um duplo objetivo: apoiar, por uma outra rota, a tese de que Gaia é um programa de pesquisa científico, e evidenciar as claras contribuições desta para a nossa compreensão do funcionamento e da dinâmica planetária.

O episódio em questão está relacionado a uma hipótese elaborada por Lovelock e colaboradores (1972) para dar conta de um problema encontrado na compreensão do ciclo do enxofre: trata-se de saber qual seria o intermediário estável que poderia transportar o enxofre dos oceanos para a terra, completando, assim, aquele ciclo. O ambiente terrestre perde regularmente enxofre na água que corre dos rios para os oceanos. A ação mecânica da água ao longo do rio provoca a lixiviação e erosão dos solos ou rochas de modo que o resultado é uma água cada vez mais rica em enxofre (presente na forma dos íons sulfato). Assim, caso não existisse algum mecanismo que trouxesse o enxofre de volta dos oceanos para a terra, os organismos terrestres não sobreviveriam, por estarem privados de um elemento essencial. Evidentemente, nós sabemos que os organismos terrestres sobrevivem e sabemos também que não estão privados de enxofre. Mas então qual seria o mecanismo de reposição do enxofre para os ecossistemas terrestres? Eis a questão com que Lovelock e seus colaboradores se depararam.

Até o início da década de 1970, todos os modelos sobre o ciclo do enxofre continham um componente de enxofre volátil ou gasoso, que seria supostamente o responsável pela transferência de enxofre dos oceanos para o ar e, em seguida, para as massas de terra (Charlson et al., 1987). A visão científica convencional sobre o ciclo do enxofre exigia, então, que grandes quantidades de sulfeto de hidrogênio (H_2S) fossem emitidas dos oceanos, para compensar a perda de enxofre das áreas continentais. Entretanto, a água do mar é muito oxidante para permitir a existência de concentrações suficientes de H_2S para realizar a transferência do enxofre para a terra (Lovelock et al, 1972; Lovelock,

[1991]2000). Além disso, o H_2S produz um odor muito forte e característico, o que o tornaria facilmente detectável. No entanto, tal composto não havia sido encontrado, o que colocava em dúvida a visão convencional sobre a transferência de enxofre dos oceanos para a terra.

Assim, apoiando-se num trabalho de Fred Challenger (Lovelock et al, 1972), no qual o autor observara que muitos organismos marinhos emitem sulfeto de dimetila (DMS), Lovelock e colaboradores (1972, p. 237) propuseram, então, que o “DMS é o composto natural de enxofre que cumpre o papel originalmente atribuído ao H_2S ; aquele de transferir o enxofre dos mares através do ar para as superfícies de terra.”³¹. É importante notar que a sugestão de que o DMS seria o intermediário envolvido na dinâmica planetária do enxofre foi baseada numa das teses centrais do programa de pesquisa Gaia: a de que os seres vivos estão profunda e sistematicamente envolvidos em mecanismos de regulação das variáveis físico-químicas da Terra, freqüentemente atuando como fontes de compostos químicos que podem ser detectados, por exemplo, na atmosfera.

Posteriormente ao trabalho de 1972, Lovelock e outros pesquisadores estabeleceram que muitas espécies de algas marinhas emitem DMS (Lovelock [1988]1995, [1991]2000 e Gabric et al., 2001), apesar de contemporaneamente evidências apontarem que outros compostos químicos, não apenas o DMS, também podem estar envolvidos na nucleação de nuvens (Para maiores detalhes, ver Ayers & Cainey, 2007, Cainey, 2007 e Liss & Lovelock, 2007). Seja como for, sabemos hoje que o DMS representa papel importante na formação de nuvens, sendo que a proposta de Lovelock e colaboradores foi incorporada à CST e à biogeoquímica, figurando hoje como parte do conhecimento científico convencional sobre a Terra (Kump et al, 1999; Jacobson et al, 2000).

Assim, apoiando-se em uma série de trabalhos prévios sobre o enxofre, a formação de nuvens e embasados por uma visão sistêmica sobre a Terra, Lovelock e colaboradores publicaram em 1987 um artigo de revisão na *Nature* (Charlson et al, 1987) que causou grande impacto. No artigo, os autores propõem que a rápida oxidação do DMS no ar sobre os oceanos leva à formação de um aerossol (NSS-SO_4^{2-}), que, ao ser oxidado, forma

³¹ “DMS is the natural sulphur compound which fills the role originally assigned to H_2S ; that of transferring sulphur from the seas through the air to land surfaces”

núcleos que são necessários para a condensação de vapor d'água e conseqüente formação de nuvens sobre os oceanos. Estes núcleos são denominados 'núcleos de condensação de nuvens' (doravante NCN, tradução de CCN, do inglês '*cloud condensation nuclei*'). A partir da análise cuidadosa destes fatos, os autores propuseram o que ficaria conhecido na literatura como hipótese CLAW (um acrônimo, a partir dos nomes dos autores; ver Charlson et al., 1987).

De modo muito breve e esquemático, a hipótese CLAW afirma que há uma alça de retroalimentação negativa ligando as algas, o DMS e as nuvens. Segundo os autores, quanto mais quente, mais salina e mais intensamente iluminada a região do oceano, maior a taxa de emissão de DMS para a atmosfera. As porções de água nos oceanos que não estão cobertas por nuvens tendem a ser mais iluminadas e se aquecer mais, já que recebem a radiação solar diretamente. O aumento de temperatura deve aumentar a produção de DMS pelas algas, contribuindo, assim, para a maior formação de nuvens sobre os oceanos. Estas nuvens reduzem, então, a temperatura e a luminosidade da superfície, porque refletem boa parte da radiação solar. A diminuição da temperatura na superfície da água leva, então, a uma menor produção de DMS, o que reduz a produção de nuvens, levando novamente a um aumento da incidência de raios solares sobre a superfície da água (ver figura 1).

Devemos apontar que a relação entre a refletividade das nuvens e o clima já havia sido imaginada por Twomey em 1977 (Ayers & Cainey, 2007, p. 367). E quatro anos antes da proposta de Charlson e colaboradores, Shaw (1983, *apud* Ayers & Cainey, 2007, p. 367) propusera, que aerossóis atmosféricos de enxofre provenientes da biota poderiam participar do balanço radiativo do planeta afetando significativamente o clima. Entretanto, nenhuma destas propostas realizava a ligação entre as algas, as nuvens, o ciclo do enxofre e o clima global, de modo tão integrado e heurísticamente rico como a proposta de Charlson et al (1987).

A hipótese CLAW tem suscitado uma intensa discussão desde que foi proposta, particularmente devido às suas implicações para o problema do aquecimento global (Schwartz, 1988; Andreae & Crutzen, 1997; Simó, 2001; Gabric et al, 2001; Monson & Holland, 2001; O'Dowd et al, 2002; van Rijssel e Gieskes, 2002; Jones & Roberts 2004; Kloster et al., 2006, Vallina et al, 2007). Em maio de 2008, o artigo de Charlson et al (1987)

foi citado 1577 vezes no banco de dados Web of Science, o que sugere que ele se tornou um trabalho clássico da biogeoquímica. Charlson, Lovelock, Andreae e Warren receberam, em 1988, o prêmio Norbert Gerbier-Mumm, uma honraria importante concedida pela Organização Meteorológica Mundial (“World Meteorological Organization”), vinculada à ONU, como reconhecimento por suas descobertas e pela elaboração de um mecanismo para o ciclo do enxofre, (WMO, 2007). A concessão de um prêmio como este, por uma organização internacional importante, evidencia o aumento de credibilidade das pesquisas com Gaia, no âmbito da comunidade científica internacional.

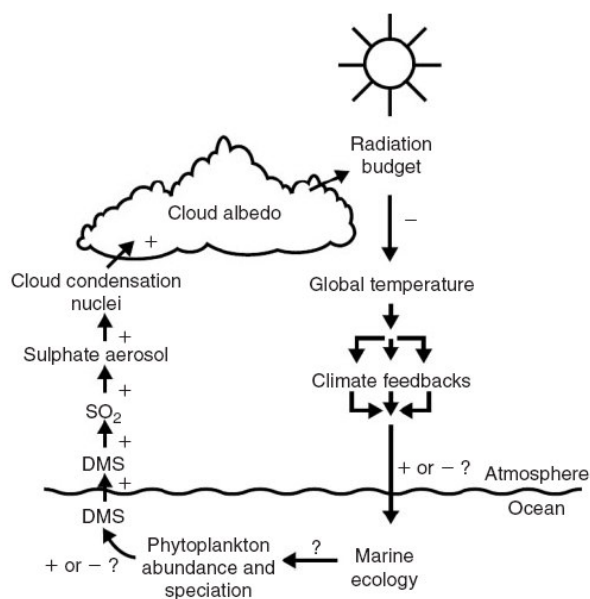


Figura 1: Representação simplificada e esquemática da hipótese CLAW (retirado de Ayers & Caine, 2007, p. 367). Os sinais de + ou - indicam respectivamente, feedback positivo ou negativo. A interrogação indica que ainda há dúvidas da comunidade científica acerca da relação específica apontada.

É importante entender que os mecanismos de regulação propostos pela hipótese CLAW não existem como parte de algum ‘plano’ para manter a superfície planetária a uma temperatura relativamente constante (compensando assim o efeito aquecedor dos gases estufa). A liberação do DMS traz uma série de benefícios para as algas, já que as nuvens alteram a temperatura local, além de aumentarem a velocidade dos ventos e agitarem as águas de superfície, misturando as camadas mais ricas em nutrientes que ficam sob a zona de fotossíntese já esgotada (para uma abordagem evolutiva deste fenômeno, ver Hamilton

& Lenton, 1998). A síntese do precursor do DMS tem custos metabólicos para as algas e, portanto, estes custos devem ser compensados com benefícios próprios. Com efeito, há evidências de que o precursor do DMS cumpre, no mínimo, quatro papéis: (1) é um soluto que contribui para o equilíbrio osmótico celular (Stefels, 2000; Kirst, 1996); (2) um antioxidante (Sunda et al., 2002); (3) um inibidor da cisteína e da metionina (através de um mecanismo de superabundância [*overflow mechanism*], cf. Stefels, 2000, p. 192); e (4) um mediador de informação química em interações contra predadores (Steinke et al., 2002; Stefels, 2000; Wolfe et al., 1997;). Estas quatro funções fisiológicas parecem ser importantes para o sucesso reprodutivo das algas e, por isso, trata-se de um comportamento que pode ter sido selecionado evolutivamente.

Apesar de sua aceitação por parte da comunidade científica e de seu papel potencial na compreensão do sistema Terra, a hipótese CLAW ainda não pode ser adequadamente testada, na medida em que os mecanismos de retroalimentação envolvendo processos atmosféricos e oceânicos são bastante complexos (Kloster et al., 2006) e vários aspectos da oxidação do DMS na atmosfera não são ainda bem compreendidos (Andreae & Crutzen, 1997; Vallina et al., 2007; Ayers & Cainey, 2007).

Contudo, se a hipótese CLAW será mantida ou refutada é uma questão secundária para o nosso argumento. Esta é uma questão empírica que será resolvida, a seu próprio tempo, pela comunidade científica. Nosso foco aqui está dirigido para uma questão epistemológica, i.e., a capacidade do programa de pesquisa Gaia de gerar novas previsões e novas questões de pesquisa, que é muito bem ilustrada por este episódio. Os estudos pioneiros de Lovelock e colaboradores em 1972, assim como a proposta de Charlson e colaboradores, em 1987, deram origem a todo um novo campo de pesquisas. Nesta nova área de investigação científica, com caráter fortemente interdisciplinar, que recebe o nome de conexão ou *link* algas-nuvens, pesquisadores de áreas como a geoquímica, a geofísica, a biogeoquímica, a climatologia, a meteorologia, a taxonomia, a oceanografia e a biologia evolutiva vêm atuando em colaboração estreita (para maiores detalhes sobre esta área de pesquisas ver Nunes Neto et al., 2008). Isso ilustra o poder preditivo, explicativo, heurístico e de síntese de Gaia.

Além disso, é importante acrescentar, fazendo ou não parte de um mecanismo de controle do clima nos moldes da hipótese CLAW, está claro, como bem apontaram Ayers e

Caine (2007, p. 370) que “micro e macro-algas tem um importante papel no sistema climático pois provêm os gases precursores [...] para formação de novas partículas, e fornecem uma fonte de NCN, sem os quais nós não teríamos quaisquer nuvens”. Christner et al. (2008) destacam que os aerossóis produzidos biologicamente (principalmente por microorganismos) são ubíquos e constituem as principais fontes de partículas ativas para induzir a formação de nuvens, particularmente sob condições de alta temperatura. Está claro, portanto, que as partículas de aerossóis cumprem papel crucial tanto na condensação quanto na formação de nuvens.

Usando a terminologia da teoria da ciência de Lakatos ([1970]1995), podemos dizer que houve uma alteração progressiva do problema que se buscava resolver dentro do programa de pesquisa Gaia. Um esforço de pesquisa que se iniciou buscando um intermediário para o ciclo do enxofre não apenas encontrou o composto procurado, mas acabou por descobrir uma relação nova entre o metabolismo das algas e a cobertura de nuvens sobre o oceano, com implicações importantes para a compreensão do clima da Terra. Nos termos de Lakatos ([1970]1995, pp. 31-37, p. 33), trata-se de uma “alteração de problemas teoricamente progressiva”, que deu origem a toda uma nova área de pesquisa, como vimos acima. É necessário ter em mente que a visão anteriormente convencional dizia que uma fonte puramente físico-química poderia produzir o intermediário desconhecido do ciclo do enxofre, no caso, o H_2S . Porém, diferentemente das fontes não-biológicas, os seres vivos produzem compostos de enxofre e os liberam continuamente³² (Charlson et al, 1987; Lovelock, [1991]2000, Lovelock et al, 1972). A descoberta do DMS foi possível devido a algumas idéias centrais do programa de pesquisa Gaia, como a atribuição de funções aos componentes do sistema e o entendimento dos organismos vivos como fonte de muitos compostos importantes nos ciclos dos elementos químicos.

Não podemos perder de vista ainda, inclusive como parte da resposta à crítica de Gould (apontada na seção 4), que a hipótese CLAW representa um novo mecanismo não apenas para a biogeoquímica do enxofre em particular, mas sugere fortemente inovações

³² As principais fontes não-biológicas de enxofre, excluindo as atividades industriais humanas, são os vulcões e as fumarolas, que liberam H_2S e SO_2 . Esses processos são responsáveis apenas por cerca de 10 a 20% do fluxo natural de compostos de enxofre para a atmosfera. Além disso, a liberação de gases por essas fontes não-biológicas é altamente variável no espaço e no tempo, sendo que pequenas erupções vulcânicas geralmente são de importância apenas local. Por sua vez, grandes erupções vulcânicas, que tendem a influenciar áreas maiores, são eventos muito raros (Charlson, et al. 1987).

teórico-metodológicas para o estudo dos ciclos biogeoquímicos em geral, da interação entre organismos e seu meio material e enfim, para investigações sobre o clima global. Deste modo Gaia pode contribuir para uma compreensão integrada dos ciclos biogeoquímicos. Por exemplo, o DMS é um composto que participa a um só tempo de dois ciclos, o de uma substância fundamental, a água (pois o vapor d'água agrega-se aos NCN para a formação das nuvens) e do elemento enxofre, e representa assim, um elo de ligação entre eles. Além disso, o DMS, por atuar na formação de nuvens e na conseqüente redução da temperatura da superfície planetária, figura como importante elemento para a compreensão do clima global, sobretudo quando existe uma tendência de aquecimento provocada pelo acúmulo e constante liberação de gases do efeito estufa.

Compreender o complexo processo da mudança climática em curso depende crucialmente de uma abordagem integrada dos ciclos biogeoquímicos, pois o processo de aumento crescente da temperatura planetária tem uma dimensão global, não apenas local. Em outras palavras, a regulação da temperatura planetária (a qual é vista freqüentemente como a principal variável alterada no processo de mudança climática) é uma propriedade sistêmica e não apenas de partes do sistema Terra. Apenas abordagens sobre os ciclos biogeoquímicos, como, por exemplo, a proporcionada por Gaia, que busquem integrar tais ciclos numa grande rede pode dar subsídios para a compreensão do complexo processo de mudança climática.

Uma compreensão adequada da dinâmica do sistema Terra, para a qual contribuem os estudos com o DMS, no campo da conexão algas-nuvens, pode dar subsídios para aplicações de engenharia climática (ou geoengenharia), como aquela apresentada por Lovelock e Rapley (2007), em carta à *Nature*, na qual propuseram um mecanismo para a mitigação dos efeitos do aquecimento global. A proposta leva em conta o papel das algas oceânicas na liberação de DMS e na captura de CO₂. Os autores defendem que sejam usados nos oceanos tubos ou canos verticais, flutuantes ou amarrados, com o objetivo de “aumentar a mistura de águas ricas em nutrientes abaixo da termoclina^[33] com as águas relativamente estéreis da superfície oceânica”³⁴ (Lovelock & Rapley, 2007, p. 403). Estes

³³ Trata-se da região de transição de temperatura entre a superfície oceânica e o oceano profundo (cf. Murray, 2000, p. 240).

³⁴ “to increase the mixing of nutrient-rich waters below the thermocline with the relatively barren waters at the ocean surface.”

canos, de acordo com os autores, deveriam ter de 100 a 200 metros de comprimento e 10 metros de diâmetro e bombeariam a água do fundo para a superfície, fornecendo, assim, nutrientes para as algas acima da termoclina. Esta oferta extra de nutrientes aumentaria a taxa de crescimento das algas e, em consequência, a taxa fotossintética, a qual está correlacionada à taxa de captura de CO₂ atmosférico. Além disso, as algas aumentariam sua emissão de DMS, o que, em última instância, resfriaria o planeta, devido à sua contribuição para a formação de nuvens. De fato, conforme sugeriram Jones & Gabric (2006, p. 28), o DMS pode ser tratado, se a hipótese CLAW estiver correta, como um “gás estufa negativo” e a duplicação de sua quantidade na atmosfera poderia levar a um resfriamento da superfície planetária em até 1,3 °C³⁵.

De acordo com Lovelock e Rapley (2007), a intervenção que eles propõe pode falhar em aspectos econômicos ou de engenharia, e os impactos sobre a acidificação dos oceanos devido ao aumento da captura de CO₂ também devem ser levados em conta. Porém, diante do alto risco que enfrentamos com uma concentração elevada e crescente de gases estufa na atmosfera, os autores propõem que precisamos induzir fortemente o sistema a regenerar-se. Nas palavras de Lovelock e Rapley (2007, p. 403), “A remoção de 500 gigatoneladas de dióxido de carbono do ar através do esforço humano está além da nossa atual capacidade tecnológica. Se nós não podemos ‘curar o planeta’ diretamente, nós podemos ser capazes de ajudar o planeta a curar a si mesmo”³⁶. A proposta de Lovelock e Rapley foi comentada por Shepherd, Iglesias-Rodriguez e Yool (2007), em carta publicada na edição seguinte da *Nature*. Estes autores advertem que o mecanismo de engenharia climática proposto por Lovelock e Rapley poderia “causar problemas, em vez de curá-los” (Shepherd et al., 2007, p. 781). Para eles, propostas como a de Lovelock e Rapley encerram em si um equívoco importante, na medida em que simplesmente aumentar o crescimento do fitoplâncton não é suficiente. Shepherd e colaboradores (2007) citam experimentos recentes

³⁵ Ainda de acordo com estes autores (p. 28), o DMS preso em bolhas de ar no gelo seria liberado para a atmosfera com o derretimento da calota Antártica, o que constitui uma interessante hipótese a ser testada sobre os efeitos do DMS no clima antártico. Note-se ainda que este é um mecanismo similar ao proposto pela hipótese da arma dos clatratos (ou hidratos) de metano (ver Chakoumakos, 2004). Entretanto, diferentemente do metano que, uma vez liberado, aceleraria o derretimento do gelo nos pólos e, em consequência aumentaria a temperatura planetária, o DMS, por ser um gás estufa negativo, seria parte de um processo de retroalimentação negativa e atuaria no equilíbrio da temperatura planetária, contrabalançando o efeito aquecedor dos gases estufa.

³⁶ “The removal of 500 gigatonnes of carbon dioxide from the air by human endeavour is beyond our current technological capability. If we can’t ‘heal the planet’ directly, we may be able to help the planet heal itself.”

em águas oceânicas abertas, que tentaram quantificar o nível de aumento do crescimento das microalgas e de seqüestro de carbono causados por fertilização proposital da água. Os resultados mostraram que, apesar do aumento da biomassa dos produtores, não houve seqüestro de carbono no oceano profundo, porque as partículas que carregam o carbono fixado são rapidamente degradadas pela respiração dos organismos marinhos e remineralizadas dentro dos limites das águas oceânicas superiores (Shepherd et al, 2007). Assim, é provável, de acordo com estes autores, que quase todo o CO₂ capturado pelas microalgas seja devolvido à atmosfera, dentro de um ano. Além disso, o fato de interferir-se num ecossistema ainda pouco conhecido poderia gerar danos, por exemplo, alterando-se sua estrutura trófica, de tal modo que os problemas resultantes poderiam superar os possíveis benefícios³⁷.

Entretanto, intervenções no sistema Terra como a proposta por Lovelock e Rapley não são a única maneira pela qual Gaia, em geral, e a hipótese CLAW em particular, podem contribuir para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Há uma outra implicação do programa de pesquisa Gaia, de fato mais interessante, que deve ser melhor explorada pelos cientistas que constróem modelos climáticos. O *Daisyworld*, no início da década de 1980 (Watson e Lovelock, 1983), mostrou à comunidade científica a necessidade de incorporar as atividades dos seres vivos na modelagem climática, causando por isso um impacto significativo no modo como se modelavam sistemas ecológicos na época (ver Lovelock, [1988]1995, p. 47, para a controvérsia entre Lovelock e o ecólogo teórico Robert May). Por sua vez, a hipótese CLAW e os estudos que vem sendo desenvolvidos no âmbito do programa Gaia a partir da década de 1990, apontam para a enorme complexidade presente nos ciclos biogeoquímicos e para o fato de que os seres vivos não devem figurar como

³⁷ De fato, inovações em engenharia climática, como aquela proposta por Lovelock e Rapley, não são, e não devem ser vistas, como a solução instantânea para o problema do aquecimento global. A mudança na moralidade quanto às questões ambientais é também uma necessidade premente e imprescindível. Por outro lado, apenas mudança de moralidade ou adoção de novas atitudes mais condizentes com a crise ambiental contemporânea não podem dar conta do problema de maneira satisfatória. Mudar a moralidade poderá reduzir a liberação futura de gases estufa mas não será suficiente para retirar 500 gigatoneladas de carbono da atmosfera. Esta quantidade de carbono acumulado é um sub-produto da industrialização e do enriquecimento dos países desenvolvidos, que se deu desde a revolução industrial. Tendo isso em vista, não podemos defender uma visão ingênua quanto a este assunto. O que nos parece importante, no momento, é não inflacionar um destes dois elementos, a mudança de moralidade e a tecnologia, os quais são afinal, apenas *dois elementos* no jogo complexo das relações sociais e políticas onde muitos outros fatores desempenham papéis relevantes. Não iremos desenvolver nossos argumentos acerca destas questões aqui, porém pretendemos fazê-lo, em um próximo artigo onde abordaremos as relações complexas entre tecnologia e ética, focando especialmente sobre o problema da crise climática contemporânea.

personagens secundários nos modelos climáticos, mas sim como elementos cruciais para o entendimento da dinâmica global dos elementos. As algas, por exemplo, são sorvedouros de CO₂ e fontes de DMS e O₂, substâncias importantes para a dinâmica climática no planeta. Modelos que não levam em conta o papel das algas na dinâmica global, apenas para usar um exemplo, não são apenas representações muito simplificadas do sistema natural³⁸, mas sim representações irrelevantes destes. Estamos cientes de que os trabalhos de modelagem climática têm apontado na direção de incorporar adequadamente o papel dos organismos vivos, porém ainda o fazem de modo incipiente.

A importância deste ponto não pode ser subestimada. Como apontam Ayers e Cainey (2007, p. 370) o relatório do Grupo de Trabalho 1 do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC), publicado em fevereiro de 2007 apenas menciona um mecanismo de feedback entre o DMS e o albedo planetário (IPCC, 2007, p. 504, 557), mas não menciona a hipótese CLAW, a área de pesquisa Conexão algas-nuvens, ou os trabalhos pioneiros de Lovelock e colaboradores, sobre o assunto.

Sobre a importância de considerar as questões colocadas pela hipótese CLAW, Ayers & Cainey apontam que

[...] A menos que nós compreendamos completamente as conexões biológicas-físicas-químicas-dinâmicas-microfísicas inerentes à hipótese CLAW, nós seremos incapazes de avaliar adequadamente os riscos da mudança climática para os sistemas marinhos, ou considerar estratégias apropriadas de mitigação ou adaptação. (Ayers & Cainey, 2007, p. 370)

Muitas das ações sócio-políticas acerca da questão climática tem se dado a partir de dados fornecidos por modelos do clima ou da dinâmica e das interrelações entre biosfera e atmosfera. Julgamos que tão mais acertadas serão estas ações ou decisões, quanto melhor se apoiarem em modelos que consideram o papel dos seres vivos, algo já reconhecido no estudo dos ciclos biogeoquímicos. Incorporar seriamente nestes modelos, princípios

³⁸ Em medidas variáveis, todos os modelos são, de fato, representações simplificadas de algum sistema. Porém, o ponto aqui diz respeito ao grau em que são incorporados certos elementos no modelo e em consequência toca na questão da relevância dos modelos para a geração de conhecimento e para as tomadas de decisões (com uma grande implicação sócio-política).

teóricos, que tem se mostrado heurísticamente poderosos, provenientes do programa de pesquisa Gaia, corresponde a caminhar a passos largos nesta direção.

8. Considerações finais

Neste artigo, oferecemos uma revisão sobre o surgimento e desenvolvimento do programa de pesquisa Gaia, através dos esforços pioneiros de James Lovelock, na década de 1960. A atuação de Lovelock como cientista em diferentes instituições de pesquisa e o seu contato com diversas disciplinas, como a química, a fisiologia, a medicina e a astrobiologia, podem ser vistos como fatores que tornaram possível o desenvolvimento do programa de pesquisa Gaia, uma abordagem sobre a vida na Terra com caráter fortemente interdisciplinar. Além disso, não devemos perder de vista, como apontamos neste trabalho, que o desenvolvimento do construto teórico em seus estágios iniciais teve estreita relação com eventos sócio-culturais importantes do século XX, como o início da exploração espacial e o surgimento do movimento ambientalista na década de 1960.

Dedicamo-nos também a analisar algumas questões epistemológicas suscitadas por Gaia. A questão da legitimidade epistemológica de afirmar que a Terra é um superorganismo, ainda que metaforicamente, suscita importantes objeções. Defendemos que estas afirmações, reiteradamente propaladas por Lovelock, não são as responsáveis pelas previsões bem sucedidas do programa de pesquisa. Ao invés disso, devemos dirigir nossa atenção para uma outra tese que é compartilhada pelos cientistas envolvidos com Gaia. Trata-se, da afirmação de que existe no planeta Terra um sistema cibernético de controle que inclui a biota e o ambiente físico-químico, intimamente associados através de inúmeras alças de retroalimentação negativas e positivas. Estas alças levam à auto-regulação de variáveis globais importantes, como a temperatura planetária, a composição química da atmosfera, entre outras, como propriedades emergentes do sistema.

A questão das explicações teleológicas ou funcionais em Gaia também coloca dificuldades importantes para o programa de pesquisa, como mostramos, sobretudo a partir das críticas de Kirchner. Entretanto, defendemos que a análise funcional de Robert Cummins ([1975]1998) pode dar conta dos usos de função realizados no âmbito do programa de pesquisa Gaia.

As objeções dirigidas a Gaia pelos biólogos darwinistas deram origem a um importante debate com implicações não apenas para o programa de pesquisa Gaia, mas também para a biologia evolutiva. Lenton (2004) apresentou um argumento particularmente forte, que recoloca em termos diferentes o problema. Trata-se do argumento de que a regulação do sistema vida/ambiente físico-químico não precisa ser um objetivo da evolução, mas, em alguns casos importantes, resulta de efeitos colaterais, ou seja, de sub-produtos do processo evolutivo, ou em particular, da seleção natural.

O programa de pesquisa Gaia, como vimos, tem contribuído significativamente para a construção de uma visão sistêmica sobre o sistema Terra, a qual se consolidou com o nome de Ciência do Sistema Terra. Dentre as principais contribuições de Gaia para esta nova ciência, estão os modelos propostos por Lovelock e colaboradores acerca do ciclo do enxofre, episódio que gerou todo um novo campo de pesquisas interdisciplinares (Lovelock et al, 1972; Charlson et al, 1987).

A seguinte declaração de Stephen Schneider e colaboradores (Schneider et al., 2004) revela como Gaia tem aumentado sua credibilidade perante a comunidade científica:

Hoje, a expressão ‘ciência Gaiana’ é usada com mais frequência, em lugar da expressão mais antiga ‘hipótese Gaia’. Entretanto, juntamente com a evolução para uma ciência Gaiana, surgiu um foco mais definido sobre o que é “controlado” ou não controlado – e por quais processos. Além disso, discussões francas ajudaram a corrigir grande parte da linguagem frouxa e das definições imprecisas dos dias iniciais do debate e, assim, a ciência da Terra tem sido enriquecida por uma década e meia de atividades da ciência Gaiana. (Schneider et al., 2004, p. xiv)³⁹.

O programa de pesquisa Gaia ofereceu e continua a oferecer contribuições importantes para o estabelecimento de uma visão sistêmica sobre a Terra, que se consolidou com a CST. A visão sobre a vida na Terra e seu ambiente físico-químico, proporcionada por Gaia é de grande impacto para a ciência em particular, e para nossa visão de mundo em

³⁹ Também em Schneider e colaboradores comparece a visão equivocada sobre o estatuto epistemológico da teoria, na linha do que comentamos em nota anterior. Note-se, logo na frase seguinte, que eles fazem referência à idéia de “evolução para uma ciência gaiana” a partir da noção mais antiga “hipótese gaia”.

geral. James Kirchner, que já foi um crítico contumaz de Gaia, assinalou em 2002 que “compreender o sistema Terra, em toda a sua complexidade fascinante, é a aventura científica mais importante do nosso tempo” (Kirchner, 2002, p. 406). Diante da magnitude dos desafios que temos pela frente, enquanto humanidade, é difícil não concordar com suas palavras. Acreditamos, que neste sentido, o programa de pesquisa Gaia tem contribuições importantes a dar.

Agradecimentos

N.F.N.N. agradece ao CNPq, pela bolsa de mestrado concedida durante a realização deste trabalho e à FAPESB por financiamento de projeto de pesquisa. C.N.E.H. agradece ao CNPq por bolsas de produtividade em pesquisa e pós-doutorado, e à FAPESB e ao CNPQ por financiamentos de projetos de pesquisa.

Referências

- Abram, D. The Mechanical and the Organic: On the Impact of Metaphor in Science. In: Schneider, S.H. & Boston, P.J. *Scientists on Gaia*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 66-74, 1993.
- Andreae, M.O.; Crutzen, P.J. Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, vol. 276, p. 1052-1058, 1997.
- Andrew, A.M. Global warming and nuclear power. *Kybernetes*, vol. 36, n. 3/4, pp. 465-468, 2007.
- Atreya, S.K.; Mahaffy, P.R.; Wong, A.-S. Methane and related trace species on Mars: Origin, loss, implication for life and habitability. *Planetary and Space Science*, vol. 55, n. 3, p. 358-369, 2007.
- Ayers, G.P. & Cainey, J.M. The CLAW hypothesis: a review of the major developments. *Environmental Chemistry*, vol. 4, n° 6, 366–374, 2007.
- Badiner, A.H. (Ed.). *Dharma Gaia: A harvest of essays in Buddhism and ecology*. Berkeley-CA: Parallax Press, 1990.
- Barlow, C. & Volk, T. Gaia and Evolutionary Biology. *BioScience*, vol 42, n° 9, pp. 686-693, 1992.

- Brandon, R. Theory and experiment in evolutionary biology. *Synthese* 99, pp. 59-73, 1994.
- Cainey, J.M. Investigating the current thinking on the CLAW Hypothesis. *Environmental Chemistry*, vol. 6, n° 4, p. 365, 2007.
- Carmo, R.S.; Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia Theory in Brazilian High School Biology Textbooks. *Science & Education* (Dordrecht), no prelo.
- Carmo, R.S.; Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia theory in Brazilian High School Biology textbooks. *Anais da International Organisation for Science and Technology Education (IOSTE)*, 2007, Hammamet (Tunisia). Hammamet: IOSTE, 2007. p.365-379. 2007
- Carson, R. *Silent Spring*, Mariner Books: New York, [1962]2002.
- Chakoumakos, B. Preface to the Clathrate Hydrates special issue. *American Mineralogist*, vol. 89, 1153-1154, 2004.
- Chalmers, A.F. *O Que é Ciência, Afinal?* Brasiliense: São Paulo, 1993.
- Charlson, R.J.; Lovelock, J.E.; Andreae, M.O.; Warren, S.G. Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate. *Nature*, vol 326, n° 6114, pp. 655-661, abril, 1987.
- Christner, B.C.; Morris, C.E.; Foreman, C.M.; Cai, R.; Sands, D.C. Ubiquity of Biological Ice Nucleators in Snowfall. *Science*, vol. 319, p. 1214, 2008.
- Cummins, R. Functional Analysis. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press. [1975]1998.
- Cummins, R. *The Nature of the Psychological Explanation*. Cambridge, MA: MIT Press, 1983.
- Cummins, R. Neo-teleology. In: Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, pp. 157-172, 2002.
Disponível em <https://netfiles.uiuc.edu/rcummins/www/HomePage/Cummins.html>. Acesso em: 16 mar. 2006.
- Dawkins, R.. *The Extended Phenotype*. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- Dawkins, R. *O gene egoísta*. Companhia das Letras, [1976]2007.
- De Rosnay, J. History of Cybernetics and Systems Science. in: F. Heylighen, C. Joslyn and V. Turchin (eds): *Principia Cybernetica Web* (Principia Cybernetica, Brussels), URL: <http://pespmc1.vub.ac.be/CYBSHIST.html>. 2000.

Dick, S. & Strick, J.. *The Living Universe: NASA and the Development of Astrobiology*. Piscataway, New Jersey: The State University of New Jersey. 2005.

Ezzel, E.C. & Ezzel, L.N. *On Mars: Exploration of the Red Planet. 1958-1978*. <http://history.nasa.gov/SP-4212/contents.html>. Acessado em 26 de janeiro de 2008. 1984.

Free, A. & Barton, N. Do evolution and ecology need the Gaia hypothesis? *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 22, n. 11, pp. 611-619, 2007.

Gabric, A.; Gregg, W.; Najjar, R.G.; Erickson, D. J. III; & Matrai, P. Modeling the Biogeochemical Cycle of Dymethylsulfide in the Upper Ocean: a Review. *Chemosphere – Global Change Science*, vol 3, nº 4, pp. 377-392, 2001.

Gould, S.J.. *The Structure of Evolutionary Theory*. Cambridge-MA: Harvard University Press, 2002.

Guimarães, M.D. *A teoria Gaia no Ensino de Biologia: Revisão crítica de literatura e proposta de seqüência de ensino para sua inclusão no ensino médio*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2007.

Guimarães, M.D.; Lima-Tavares, M.; Nunes Neto, N.F.; Carmo, R.S.; El-Hani, C.N. A teoria Gaia deve ser ensinada? *Pesquisa em Educação Ambiental*, no prelo.

Hamilton, W.D. & Lenton, T.M. Spora and Gaia: How Microbes Fly with Their Clouds. *Ethology, Ecology & Evolution*, vol. 10, nº 1, pp. 1-16, 1998.

Hesíodo. *Teogonia*. São Paulo: Iluminuras, 2006.

Hitchcock, D. & Lovelock, J.E. Life Detection by Atmospheric Analysis. *Icarus*, 1967

Hobsbawm, E. *Era dos Extremos: o breve século XX – 1914-1991*. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

IPCC, 2007: *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M.; Miller, H.L. (Eds.). Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: 20 out. 2007.

Jacobson, M.C. Charlson, R.J.; Rodhe, H.; Orians, G.H. *Earth System Science: From Biogeochemical Cycles to Global Changes*, 2000.

Johnson, D.R.; Ruzek, M.; Kalb, M. What is Earth System Science? *Proceedings of the 1997 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Singapore*, pp. 688-691, 1997.

Jones, G. & Gabric, A. Sulphur aerosols released from melting sea ice may influence Antarctic climate. *Australian Antarctic Magazine*, pp. 28-29, n 10, 2006.

Jones, A. & Roberts, D.L. An Interactive DMS Emissions Scheme for the Unified Model. Hadley Centre technical note 47. Exeter-UK: *Hadley Centre - Met Office*. February, 2004.

Kirchner, J.W. The Gaia hypothesis: Can it be tested? *Reviews of Geophysics*, vol. 27, n° 2, pp. 223-235, 1989.

Kirchner, J.W. Gaia: metaphor unfalsifiable. *Nature*. 345, p. 470, 1990.

Kirchner, J.W. The Gaia Hypothesis: Are they Testable? Are they Useful? in: Schneider, S.H. & Boston, P.J. *Scientists on Gaia*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 38-46, 1993.

Kirchner, J.W. The Gaia hypothesis: fact, theory and wishful thinking. *Climatic Change*, 52, pp. 391-408, 2002.

Kirchner, J.W. The Gaia Hypothesis: Conjectures and Refutations. *Climatic Change*, 58. pp. 21-45, 2003.

Kirst, G.O. Osmotic adjustment in phytoplankton and macroalgae: the use of dimethylsulfoniopropionate (DMSP). In: Kiene, R.P.; Visscher, P.T.; Keller, M.D.;Kirst, G.O. (Eds.). *Biological and Environmental Chemistry of DMSP and Related Sulfonium Compounds*, Plenum Press: New York, pp. 121–129, 1996.

Kleidon, A. Testing the Effect of Life on Earth's Functioning: How Gaian is the Earth System? *Climatic Change*. Vol. 52, pp. 383-389, 2002.

Kloster, S.; Feichter, J.; Maier-Reimer, E.; Six, K.D.; Stier, P.; Wetzel, P. 'DMS Cycle in the Marine Ocean-atmosphere System – A Global Model Study', *Biogeosciences*, vol. 3, pp. 29-51, 2006.

Kroll, Gary. *Rachel Carson Silent Spring: A Brief History of Ecology as a Subversive Subject*. Online Ethics Center for Engineering, <http://onlineethics.org/CMS/profpractice/exempindex/carsonindex/kroll.aspx>. Acessado em 25 de janeiro de 2008. 2006.

Kump, L.R.; Kasting, J.F.; Crane, R.G. *The Earth System*. Prentice Hall: New Jersey, 1999.

Lakatos, I. Falsification and the methodology of scientific research programmes [1970]. Vol. 1, pp. 8-101. in: Worrall, J.; Currie, G. (eds). *The methodology of scientific research programmes, Philosophical Papers, vol. 1*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 2 vols.

Larvor, B.. *Lakatos: An Introduction*. London and New York: Routledge, 1998.

Laudan, L. Commentary: Science at the bar – Causes for concern [1982], in: Curd, M. & Cover, J. A. *Philosophy of Science: The Central Issues*. New York: W. W. Norton & Co. pp. 48-53, 1998.

Leff, E. *Racionalidade Ambiental: a reapropriação social da natureza*. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.

Lenton, T.M. Gaia and Natural Selection. *Nature*, 394, nº 6692, pp. 439-447, 1998.

Lenton, T.M. Testing Gaia: The Effect of Life on Earth's Habitability and Regulation, *Climatic Change*, vol. 52, pp. 409–422, 2002.

Lenton, T.M. Clarifying Gaia: Regulation with or without Natural Selection. 2004. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. Cambridge-MA: The MIT Press, 2004.

Lenton, T.M. & Lovelock, J.E. Daisyworld is Darwinian: Constraints on Adaptation are Important for Planetary Self-regulation. *Journal of Theoretical Biology*, vol. 206, nº 1, pp. 109-114, 2000.

Lenton, T.M. & Lovelock, J.E. Daisyworld Revisited: Quantifying Biological Effects on Planetary Self-regulation. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, vol. LIII, nº 3, pp. 288-305, 2001.

Lenton, T.M. & van Oijen, M. Gaia as a complex adaptive system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, vol. 357, pp. 683-695, 2002.

Lenton, T.M. & Watson, A. Redfield revisited: 1. Regulation of nitrate, phosphate and oxygen in the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 14, n. 1, pp. 225-248, 2000

Levit, G.S & Krumbein, W.E. The biosphere-theory of V.I. Vernadsky and the Gaia-theory of James Lovelock: a comparative analysis of the two theories and traditions. *Journal of General Biology*, vol. 61, n. 2, pp. 133-144, 2000.

Lewontin, R. The Organism as the Subject and Object of Evolution. In: Levins, R. & Lewontin, R. *The Dialectical Biologist*. Cambridge-MA: Harvard University Press, pp. 85-106, 1985.

Lewontin, R. *A Tripla Hélice: gene, organismo e ambiente*. São Paulo: Companhia das Letras. 2002.

Lima-Tavares, M. *Gaia e Ciência: Uma Análise da Cientificidade da teoria Gaia de acordo com a Metodologia dos Programas de Pesquisa de Lakatos*. Salvador: Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Dissertação de Mestrado, 2003.

- Lima-Tavares, M. & El-Hani, C.N. Um olhar epistemológico sobre a transposição didática da teoria Gaia. *Investigações em ensino de ciências*, vol. 6, nº 3, dezembro, 2001.
- Liss, P. & Lovelock, J. Climate change: the effect of DMS emissions. *Environmental Chemistry*, vol. 6, nº 4, pp. 377-378, 2007.
- Lovelock, J.E. A Physical Basis for Life Detection Experiments, *Nature*, vol. 207, n. 7, pp. 568-570, 1965.
- Lovelock, J.E. Atmospheric Fluorine Compounds as Indicators of Air Movements. *Nature*, 230, p. 379, 1971a.
- Lovelock, J.E. Air pollution and Climatic Change. *Atmospheric Environment*, jun., vol. 5, n. 6, pp. 403-411, 1971b.
- Lovelock, J.E. Letter to the Editors – Gaia as seen through the atmosphere. *Atmospheric Environment*, vol. 6, pp. 579-580, 1972.
- Lovelock, J.E. *Gaia: A new look at life on earth*. Oxford: Oxford University Press, [1979]2000.
- Lovelock, J.E. The electron capture detector – a personal odyssey. *Chemtec*, september, pp. 531-537, 1981.
- Lovelock, J.E. ‘Are we Destabilising World Climate? The Lessons of Geophysiology’, *Ecologist* 15, pp. 52-55, 1985.
- Lovelock, J.E. ‘Geophysiology: A New Look at Earth Science’, *Bulletin of the American Meteorological Society* 67, pp. 392-396, 1986.
- Lovelock, J.E. *As Eras de Gaia: uma biografia da nossa Terra viva*. Rio de Janeiro: Campus, [1988]1995.
- Lovelock, J.E. *The Ages of Gaia: a Biography of our living Earth*. New York: W.W. Norton & Company, Inc., 1988.
- Lovelock, J.E. Hands up for the Gaia hypothesis. *Nature*, vol. 344, pp. 100-102, 1990.
- Lovelock, J.E. Gaia um Modelo para a Dinâmica Planetária e Celular, in: Thompson, W. I. (Org.). *Gaia uma Teoria do Conhecimento*. São Paulo: Editora Gaia Ltda, pp. 77-90, [1990]2000.
- Lovelock, J.E. *Gaia: the Practical Science of Planetary Medicine*. Oxford: Oxford University Press, [1991]2000.
- Lovelock, J.E. *Homage to Gaia – The Life of an independent scientist*. Oxford: Oxford University Press, 2001.

Lovelock, J.E. Commentary: Gaia and Emergence – a response to Kirchner and Volk. *Climatic Change*, vol. 57, pp. 1-3, 2003.

Lovelock, J.E. Reflections on Gaia. Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. Cambridge-MA: The MIT Press, pp. 1-6, 2004.

Lovelock, J.E. *A vingança de Gaia*. Tradução de Ivo Kirtovsky. Intrínseca: Rio de Janeiro, 2006a.

Lovelock, J.E. James Lovelock: essays, lectures and other writings. *Personal website of James Lovelock*. www.jameslovelock.org. Consultado em 01/09/2007, 2006b.

Lovelock, J.E. & Giffin, C.E. Planetary Atmospheres: Compositional and other Changes Associated with the Presence of Life. *Advances in the Astronautical Sciences*, vol. 25, pp.179-193, 1969.

Lovelock, J.E. & Hitchcock, D. Detecting planetary life from Earth. *Science Journal*, april, 1967.

Lovelock, J.E; Maggs, R.J; Rasmussen, R.A. Atmospheric Dimethyl Sulphide and the Natural Sulphur Cycle. *Nature*. vol. 237. pp. 452-453. 1972.

Lovelock, J.E.; Margulis, L. Atmospheric homoestasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. *Tellus* . vol. 26. n° 1-2. pp. 2-10. 1974a.

Lovelock J.E. & Margulis, L. Homeostatic tendencies of the Earth's atmosphere. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. 5:93-103, 1974b.

Lovelock, J.E. & Rapley, C. Ocean pipes could help the Earth to cure itself. *Nature*. Vol. 449, n° 27, September. 2007.

Margulis, L. & Lovelock, J.E. Biological modulation of the atmosphere. *Icarus*. vol.21. pp. 471-489. 1974

Margulis, L. 'James Lovelock's Gaia', in P. Bunyard (ed.) *Gaia in Action: Science of the Living Earth*, Floris Books, Edinburgh, 1997.

Margulis, L. 2004. Gaia by any other name. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Markoš, A. The ontogeny of Gaia: The role of microorganisms in planetary information network. *Journal of Theoretical Biology*, 176, pp. 175-180, 1995.

Meyer, D. & El-Hani, C.N. *Evolução: o Sentido da Biologia*. São Paulo: Editora UNESP, 2005.

Molina, M.; Rowland, F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, pp. 810-812, 1974.

Monson, R.K. & Holland, E.A. Biospheric Trace Gas Fluxes and their Control over Tropospheric Chemistry. *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 32, pp. 547-76, 2001.

Moorcroft, P.R. 'How Close Are We to a Predictive Science of the Biosphere?', *Trends in Ecology and Evolution*, n. 21, pp. 400-407, 2006.

Moore III, B., Underdal, A., Lemke, P. & Loreau, M. *The Amsterdam Declaration on Global Change*. http://www.sciconf.igbp.kva.se/Amsterdam_Declaration.html. Acessado em 1º de janeiro de 2008. 2001.

Murray, J.W. The Oceans. In: Jacobson, M.C. Charlson, R.J.; Rodhe, H.; Orians, G.H. *Earth System Science: From Biogeochemical Cycles to Global Changes*, Oxford, UK: Elsevier. pp. 230-278, 2000.

Nicholson, S. & Rosen, B. (orgs.). *A vida oculta de Gaia: A inteligência invisível da Terra*, São Paulo: Gaia. 1997.

Nunes Neto, N.F. *Explicações Teleológicas na Teoria Gaia*. 109f. Monografia (Bacharelado) – Instituto de Biologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia, Teleologia e Função. *Episteme* (Brasil), vol. 11, n. 23, pp. 15-48, 2006.

Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Teleologia na teoria Gaia. In: Martins, R.A.; Silva, C.C.; Ferreira, J.M.; Martins, L.A-C.P (eds.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul. Seleção de trabalhos do 5º Encontro*. Campinas: Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul (AFHIC), pp. 331-340, 2008.

Nunes Neto, N.F.; Carmo, R.S.; El-Hani, C.N. Mudanças Climáticas e Conexão Algas-Nuvens. In: Seabra, G. *Conferência da Terra: Fórum Internacional de Meio Ambiente*. João Pessoa: UFPB, pp. 133-141, 2008.

Odling-Smee, F.J., Laland, K.N., Feldman, M.W. *Niche Construction: The Neglected Process in Evolution*. Princeton: Princeton University Press. 2003.

O'Dowd, C.D.; Jimenez, J.L.; Bahreini, R.; Flagan, R.C.; Seinfeld, J.H.; Hämer, K.; Pirjola, L.; Kulmala, M.; Jennings, S.G.; & G. Hoffmann, T.. Marine Aerosol Formation from Biogenic Iodine Emissions. *Nature*, vol. 417, p. 632-636, 2002.

Odum, E. *Ecologia*. Rio de Janeiro: Guanabara. 1988.

Pigliucci, M. *Denying evolution: Creationism, scientism, and the nature of science*. Sunderland-MA: Sinauer, 2002.

Piqueras, M. Meeting the Biospheres: on the translations of Vernadsky's work. *International Microbiology*. Vol 1, pp. 165-170, 1998.

Popper, K. *Lógica da Pesquisa Científica*. Cultrix, São Paulo, [1959]1974.

Postgate, J. Gaia gets too big for her boots. *New Scientist*, vol. 118, n 1607, p. 60. 1988.

Robertson, D. & Robinson, J. Darwinian Daisyworld. *Journal of Theoretical Biology*, vol. 195, n° 1, pp. 129-134, 1998.

Sahtouris, E. *EarthDance: Living Systems in Evolution*, Praeger: New York, 2000

Scheiner, S.M. & Willig, M.R. A general theory of ecology. *Theoretical Ecology*, vol 1, n. 21, pp. 21-28, 2008.

Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Schellnhuber, H.J. 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature*, vol. 402, pp. C19-C23, 1999.

Schwartz, S.E. Are global cloud albedo and climate controlled by marine phytoplankton? *Nature*. vol. 336, n° 1, pp. 441-45. 1988.

Shepherd, J.; Iglesias-Rodriguez, D.; Yool, A. Geo-engineering might cause, not cure, problems. *Nature*, vol. 449, n. 18, p. 781, 2007.

Simó, R. Production of atmospheric sulphur by oceanic plankton: biogeochemical, ecological and evolutionary links. *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 16, n. 6, pp. 287-294, 2001.

Stefels, J. Physiological aspects of the production and conversion of DMSP in marine algae and higher plants. *Journal of Sea Research*, vol. 43, pp. 183–197, 2000.

Steinke, M.; Malin, G.; Liss, P.S. Trophic interactions in the sea: an ecological role for climate relevant volatiles? *Journal of Phycology*, vol. 38, n. 4, pp. 630–638, 2002.

Sunda, W; Kieber, D.J.; Huntsman, S. An antioxidant function for DMSP and DMS in marine algae. *Nature*, vol. 418, pp. 317–320, 2002.

Thoreau, H.D. *Walden and Civil Disobedience*. New York, NY: Barnes & Noble Classics, [1854]2003.

Tickell, C. Gaia and the Human Species. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Tickell, C. (Prefácio), in: Lovelock, J.E. *A vingança de Gaia*. Tradução de Ivo Kirtovsky. Intrínseca, Rio de Janeiro, 2006.

Vallina, S.M.; Simó, R.; Gassó, S.; Boyer-Montégut, C.; del Río, E.; Jurado, E.; Dachs, J. Analysis of a potential “solar radiation dose–dimethylsulfide–cloud condensation nuclei” link from globally mapped seasonal correlations. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 21, GB 2004, pp. 1-16, 2007

van Rijssel, M. & Gieskes, W.. Temperature, Light, and the Dimethylsulfoniopropionate (DMSP) Content of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae). *Journal of Sea Research*, vol. 48, nº 1, pp. 17-27, 2002.

Vernadsky, V.I. *Geochemistry and The Biosphere*. Essays by Vladimir I. Vernadsky. [1926] 2007.

Volk, T. *Gaia's Body: toward a physiology of the earth*. New York: Copernicus. 1998

Volk, T. Toward a Future for Gaia theory: an editorial comment. *Climatic Change*, 52, pp. 423-430, 2002.

Volk, T. Seeing Deeper into Gaia theory: a reply to Lovelock's response. *Climatic Change* 57: pp. 5–7, 2003.

Watson, A.J. & Lovelock, J.E. Biological Homeostasis of the Global Environment: the Parable of Daisyworld. *Tellus, Series B – Chemical and Physical Meteorology*, vol. XXXV, nº 4, pp. 284-289, 1983.

Wilkinson, D.M. Gaia and natural selection. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 14, n. 7, pp. 256-257, 1999.

Wilson, E.O. *Afteward*. In: Carson, R. *Silent Spring*, pp. 357-363, [1962]2002.

WMO. World Meteorological Organization. Disponível em : Winners of the Norbert Gerbier-Mumm International Award. http://www.wmo.ch/pages/about/awards/winners_mumm.html. Acessado em 20 de outubro de 2007.

Wolfe, G.V.; Steinke, M.; Kirst, G.O. Grazing-activated chemical defence in a unicellular marine alga. *Nature*, vol. 387, pp. 894–897, 1997.

CAPÍTULO 2

Neo-teleologia e análise funcional nas ciências biológicas⁴⁰

Resumo: Neste artigo, examinamos duas abordagens bastante influentes sobre a natureza das atribuições/explicações funcionais, surgidas na segunda metade do século XX: a abordagem etiológica seletcionista de Larry Wright e a análise funcional de Robert Cummins. A abordagem de Wright parece capturar de modo adequado o significado de muitas explicações em biologia evolutiva, ainda que não dê conta de toda e qualquer explicação evolutiva. A análise funcional de Cummins, por sua vez, é mais aplicável a investigações em biologia funcional, ou outras áreas científicas que lidam com sistemas complexos. Entendemos as duas teorias como empreitadas distintas, que não devem ser combinadas numa abordagem única sobre as funções. Isso nos leva a apoiar ao longo deste trabalho a tese do consenso dualista de Peter Godfrey-Smith. A legitimidade desta tese deve ser ancorada, da nossa perspectiva, na distinção entre biologia evolutiva e biologia funcional, esboçada por Mayr e Jacob. Outro ponto discutido no artigo é a crítica de Cummins às abordagens etiológicas seletcionistas, as quais ele rotula de neo-teleologia, e que, de acordo com ele, representam um renascimento da teleologia na filosofia da biologia contemporânea. Defendemos que a abordagem neo-teleológica foi exposta pela primeira vez por Wright, apesar de Cummins sequer citar aquele filósofo como um dos proponentes daquela doutrina. Embora consideremos que várias das críticas de Cummins de fato localizam falhas naquela abordagem, outras críticas perdem de vista, no nosso entendimento, pontos importantes das abordagens etiológicas de função, que não podem ser deixadas de lado, como a distinção entre função e acidente e o fato de que elas podem explicar adequadamente o aumento da frequência de traços numa população biológica. A partir das críticas de ambos os lados do debate, a compreensão sobre função na biologia tem sido sobremaneira enriquecida. As críticas apontam, em particular, para a necessidade de delimitar o escopo e o limite de cada uma das abordagens, constituindo esta mais uma vantagem do consenso dualista defendido por Godfrey-Smith.

Palavras-chave: Teleologia, Neo-teleologia, Função, Análise funcional, Abordagens etiológicas seletcionistas, Seleção natural.

Abstract: In this paper, we examine two very influential approaches about the nature of functional explanations/ascriptions, produced in the second half of the 20th century: Larry Wright's selectionist etiological approach and Robert Cummins' functional analysis. Wright's approach seem to adequately grasp the meaning of many explanations in evolutionary biology, even though it is not sufficient to account for each and every evolutionary explanation. Cummins' functional analysis, in turn, is more applicable to investigations in functional biology, or other scientific areas dealing with complex systems. We see these two theories as distinct enterprises, which, in our view, should not be combined in a single approach to functions. This leads us to support throughout this work Peter Godfrey-Smith's dualist consensus thesis. The legitimacy of this thesis should be

⁴⁰ Este artigo será submetido a *Scientiae Studia*.

supported, from our perspective, in the distinction between evolutionary and functional biology, sketched by Mayr and Jacob. Another issue discussed in this paper is Cummins' critique of selectionist etiological approaches, which he labels 'neo-teleology, and correspond, according to him, to a revival of teleology in contemporary philosophy of biology. We hold that the neo-teleological approach was presented for the first time by Larry Wright, despite the fact that Cummins does not even quote that philosopher as one of the proponents of this doctrine. Although we consider that several criticisms raised by Cummins against neo-teleology do identify flaws in this approach, other criticisms lose from sight, to our understanding, important aspects of etiological selectionist approaches to function, such as the distinction between function and accident, and the fact that it can explain adequately the spread of traits in a biological population, which cannot be disregarded. Criticisms from both sides of the debate are contributing to enrich the comprehension of function in biology. These criticisms point, in particular, to the need of fixing the targets and the limits of each approach, being this another advantage of the dualist consensus advocated by Godfrey-Smith.

Keywords: Teleology, Neo-teleology, Function, Functional analysis, Etiological selectionist approaches, Natural selection

1. Introdução

Em artigo publicado em *Scientiae Studia*, Marcelo Alves Ferreira (2003) oferece razões para a permanência da teleologia na biologia contemporânea, desde uma perspectiva realista. Estas razões, defendidas por Ferreira, incluem (i) o reduzido poder heurístico da física para explicar fenômenos biológicos; (ii) a questionável legitimidade de se usar a teleologia na biologia apenas como metáfora, ao invés de tomá-la em termos realistas; e (iii) o problema do escopo da intencionalidade e da consciência.

Apesar de concordarmos com a conclusão geral obtida por Ferreira, não podemos, neste artigo, por motivos de espaço e dos nossos objetivos, nos debruçar sobre todas as razões apontadas por ele. Destacaremos apenas um ponto para discussão. Ferreira, na sua conclusão, sugere que “valores utilitaristas” têm um papel na proposta de rejeição do pensamento finalista. Em outras palavras, se não se deseja saber o porquê dos fenômenos, mas apenas como eles ocorrem, então, de acordo com ele, não precisaríamos de teleologia. Ferreira se coloca contra esta perspectiva, como evidencia, por exemplo, uma outra passagem de seu texto, na qual ele recorre à seleção natural como tábua de salvação da causalidade na explicação evolutiva: “se nos ativermos contudo à seleção natural, podemos

descrever todo o processo evolutivo sem que a teleologia pareça ameaçar nossa noção de causalidade.” (Ferreira, 2003, p. 188)

Mesmo lidando com temas como teleologia e seleção natural, Ferreira passa ao largo das abordagens etiológicas de função em filosofia da biologia, as quais se valem da seleção natural – e oferecem um caminho interessante – para salvar a causalidade na biologia. Não obstante, este autor assume uma postura que pode ser compreendida, em nossa visão, no âmbito destas abordagens.

Com este artigo, pretendemos, em parte, abordar a questão colocada por Ferreira, a saber, por que a teleologia permanece sendo um problema a ser discutido na filosofia da biologia. Nossa aproximação do problema se fará através da discussão sobre as explicações/atribuições funcionais na filosofia da biologia, sobretudo a partir de duas teorias influentes sobre o assunto: a abordagem etiológica seletcionista de Larry Wright ([1973]1998)⁴¹ e a análise funcional de Robert Cummins ([1975]1998). Discutiremos ainda as críticas de Cummins (2002) às explicações teleológicas. Acreditamos que a discussão das idéias destes autores é inspiradora e pode conduzir-nos a caminhos interessantes para a compreensão do papel da teleologia e das explicações funcionais na biologia.

O presente artigo está estruturado como segue. Inicialmente, discutiremos a questão de se há (e se *deve* haver) unidade ou pluralismo no debate sobre as funções na filosofia da biologia contemporânea. Apresentamos nossas razões – que serão também reforçadas ao longo do artigo – para apoiar uma visão pluralista. Na terceira seção, apresentamos a teoria de Wright, a qual vemos como o modelo padrão das abordagens etiológicas seletcionistas. Na quarta seção, apresentamos e examinamos as críticas de Cummins às abordagens etiológicas seletcionistas, as quais ele nomeia de neo-teleologia⁴². Na quinta seção, apresentamos a teoria de Cummins sobre função: a análise funcional. Na sexta seção, discutimos diversas críticas levantadas contra Cummins, e por fim, na sétima seção, lançamos nossas considerações finais.

⁴¹ Na padronização das referências utilizadas neste trabalho, o ano que está entre colchetes é o ano da primeira publicação e o ano que aparece em seguida é a data da edição utilizada, caso esta tenha sido reimpressa sem modificações. Nos casos das edições mais recentes que sofreram revisão ou expansão, indicamos apenas o ano dessa nova edição.

⁴² Neste trabalho, assumimos uma equivalência entre as expressões “abordagens etiológicas seletcionistas” e “neo-teleologia”, seguindo sugestão de Cummins (2002), mais à frente apresentada. Os usos de uma ou outra expressão têm como objetivo evitar repetições.

2. Síntese ou pluralismo?

As abordagens etiológicas de função têm desempenhado um papel de destaque, sobretudo em discussões sobre evolução biológica. O trabalho seminal vinculado a esta abordagem é o artigo *Functions*, publicado por Wright em 1973, no *Philosophical Review*. Outro trabalho importante e altamente influente no debate sobre as funções, mas que não se insere na linhagem das abordagens etiológicas, é *Functional Analysis*, de Cummins, um artigo preparado por ele em 1968, mas publicado, sem alterações, apenas em 1975, no *Journal of Philosophy* (Ariew et al., 2002, pp. 417-8). Os anos subseqüentes viram um florescimento de trabalhos sobre atribuições/explicações funcionais, em grande medida devido à influência das análises destes autores (Allen et al, 1998; Hull, 2002; Wimsatt, 2002). Isso levou Hull (2002) a afirmar que a literatura produzida sobre o assunto nas últimas décadas constitui um bom exemplo de progresso em filosofia.

Pode-se sugerir que a teoria etiológica sobre função de Wright e a análise funcional de Cummins continuam a ser os dois principais pólos do debate relativo às funções na filosofia da biologia recente, em torno dos quais orbitam outras posições. A partir dos trabalhos de Wright e Cummins, outros autores, como Millikan ([1989]1998), Neander ([1991]1998) e Bigelow & Pargetter ([1987]1998), elaboraram análises que, ao enfrentar diferentes problemas, limitaram ou ampliaram o escopo das abordagens daqueles autores. Porém, seguimos a Godfrey-Smith (1993) e Hull (2002) no argumento de que os desenvolvimentos empreendidos por estes filósofos não são fundamentalmente diferentes das abordagens expostas por Wright ou Cummins. Salmon, por exemplo, considera que Bigelow & Pargetter ([1987]1998) “oferecem uma teoria das explicações funcionais que pode ser um melhoramento sobre a de Wright, mas [...] ela não é *fundamentalmente* uma abordagem diferente.” (Salmon, 1990, p. 111, ênfase no original). Assim, as abordagens de Wright e Cummins podem ser consideradas, deste ponto de vista, as análises padrão sobre a atribuição funcional em filosofia da biologia (Salmon, 1990; Godfrey-Smith, 1993; Hull, 2002; Chediak, 2006).

Os trabalhos de Wright e Cummins contribuíram para tornar o conceito de ‘função’ mais importante e até mesmo central no debate sobre as explicações teleológicas, muito embora estes autores concebiam a natureza e os objetivos das explicações funcionais de

modos bastante divergentes. Contudo, a despeito das diferenças claras entre as abordagens de Cummins e Wright, alguns filósofos propuseram unificar suas abordagens numa única estrutura teórica. Entre estas propostas, a de Philip Kitcher ([1993]1998) é a mais conhecida. Um outro exemplo, ainda que pouco desenvolvido, se encontra em Jablonka (2002, p. 584). Aqui, consideraremos somente a proposta de Kitcher.

Kitcher defende que há uma unidade na concepção de função que pode ser capturada tanto através da análise de atribuições funcionais ao longo da história da biologia, quanto por meio de usos contemporâneos em contextos biológicos e não-biológicos. Esta suposta unidade seria encontrada “na noção de que a função de uma entidade *S* é *o que S é projetada [designed] para fazer*” (Kitcher, [1993]1998, p. 479, *itálicos no original*). A síntese proposta por Kitcher seria realizada pela combinação entre as visões teóricas de Wright e Cummins sobre as funções, com o elo de ligação sendo seu conceito de projeto ou *design*⁴³. Para Kitcher, os usos de função devem se ligar a uma fonte de design, sendo que duas fontes principais são as intenções humanas e a seleção natural.

A unidade que deseja construir Kitcher é vista por Godfrey-Smith (1993) como uma “falsa unidade”. Este filósofo desenvolve, *contra* Kitcher, a tese de que existe contemporaneamente na filosofia da biologia “um consenso sem unidade” no debate sobre as funções. Este consenso consiste no reconhecimento pela comunidade de filósofos e teóricos da biologia de que há duas abordagens centrais sobre funções na filosofia da biologia, tendo cada uma delas seu próprio domínio exclusivo de aplicação. A ausência de unidade é expressa pelo fato de que estas abordagens não podem (*e ipso facto* não devem) ser conciliadas numa visão única, monolítica, que se aplique a todo e qualquer fenômeno biológico. Esta impossibilidade se dá, de acordo com Godfrey-Smith, por conta de que cada um dos dois referenciais teóricos olha para o mesmo mundo natural de modos diferentes, acentuando-lhe certos aspectos, ao passo que, naturalmente, negligenciam outros.

Esta tese, que apóia o argumento de Godfrey-Smith, é de fato uma tese trivial nos dias de hoje, porém, não sem importância no presente contexto. Não se pode “ver” algo de

⁴³ Nestes tempos atuais, nunca é demais destacar que o conceito de *design* de Kitcher não apela, como de fato não é necessário que o faça, à existência de algum projetista natural ou sobrenatural. Em suas palavras: “*design* não deve ser, contudo, entendido em termos de intenções de fundo [*background intentions*]; uma das descobertas importantes de Darwin é que nós podemos pensar em *design* sem um *designer*.” (Kitcher, [1993]1998, p. 480). Para maiores detalhes sobre a teoria de Kitcher, consultar o original (Kitcher, [1993]1998). Outra fonte na qual suas idéias são discutidas é Godfrey-Smith (1993).

lugar nenhum. Sempre que alguém se pronuncia sobre o mundo, o faz de certa perspectiva teórica, apoiado na assunção de determinados pressupostos metafísicos, epistemológicos, ideológicos etc. Ao mesmo tempo, não estão sendo assumidos outros pressupostos, que são, então, automaticamente “sustados” (Feyerabend, [1975]1977, pp. 347-445). Portanto, misturar ou combinar pressupostos muito distintos (como os assumidos por Wright e Cummins), senão mesmo contraditórios, nos parece algo arriscado e que deve ser evitado, do nosso ponto de vista.

Enquanto a teoria de Wright enfatiza a natureza histórica do mundo vivo, associando-a à origem dos traços, os quais seriam explicados por suas funções, a abordagem de Cummins enfoca a complexidade e as relações entre capacidades sistêmicas e capacidades das partes do sistema (as abordagens destes filósofos serão detalhadas nas próximas seções). Nas palavras de Godfrey-Smith:

... [A]s categorias que nós reconhecemos agora devem ser determinadas, é claro, por nossa própria visão de mundo. As análises de Wright e Cummins situam a atribuição funcional dentro de dois modos explanatórios distintos, os quais são partes legítimas de nossa visão de mundo contemporânea. Seleção natural e artificial existem, e os atributos de várias coisas podem ser explicados em termos de histórias seletivas. Sistemas complexos, organizados, também existem, e têm capacidades globais que podem ser explicadas em termos de capacidades das partes componentes. Estes são dois modos explanatórios legítimos dentro das ciências. Crucialmente para nós, estes são dois modos explanatórios *diferentes* dentro da ciência. Não há um projeto explanatório único, distinto de outros, o qual abranja estes dois modos. Eles são dois tipos de compreensão que nós podemos ter de um sistema. Aí está porque eu vejo a proposta de Kitcher como oferecendo uma falsa unidade, uma unidade à qual devemos resistir em favor de manter um entendimento acurado de diferentes estratégias explanatórias nas ciências. (Godfrey-Smith, 1993, p. 204, ênfase no original).

A posição de Godfrey-Smith, de que as duas análises em questão são dois modos distintos de ver o mundo, está em sintonia com uma observação do próprio Cummins (que discutiremos mais à frente), segundo a qual a abordagem etiológica seletivista e a análise

funcional têm diferentes *explananda*. Deste modo, se o que elas buscam explicar são coisas ou aspectos diferentes do mundo, temos mais uma razão para sustentar que uma unificação de tais abordagens se mostra, já de início, algo no mínimo difícil⁴⁴.

Além disso, a tese do pluralismo de Godfrey-Smith pode receber apoio de argumentos propostos independentemente por Ernst Mayr (1988) e François Jacob ([1970]1983). Para Mayr, que propôs a distinção no seu artigo *Cause and Effect in Biology*, em 1961, mas depois em uma série de outros trabalhos (cf. Caponi, 2001, p. 24) a biologia não é uma ciência uniforme, homogênea, mas divide-se em duas: biologia evolutiva e biologia funcional (Mayr, 1988, p. 25-6). Jacob sustenta a mesma tese, ainda que use expressões distintas: biologia tomista ou reducionista de um lado e biologia integrista ou evolucionista, de outro (Jacob, 1970[1983], p. 14). Tal distinção é retomada por Gustavo Caponi (2002, 2007), que a considera uma distinção chave para o tratamento de questões filosóficas da biologia e de outras ciências, como no caso, por exemplo, do reducionismo. O reconhecimento da legitimidade da distinção esboçada por Mayr e Jacob – sugere Caponi (2002) – pode lançar luz, inclusive, sobre o papel da teleologia nas ciências da vida⁴⁵.

À distinção entre biologia funcional e evolutiva, corresponde também uma distinção entre os tipos de causas que desempenham um papel em um ou em outro campo de investigações, as causas próximas e as causas remotas (Mayr, 1988).

A biologia funcional se ocupa das causas próximas dos fenômenos biológicos e aborda-as através de métodos essencialmente físicos e químicos. As causas próximas são os determinantes dos eventos biológicos que têm lugar na ontogenia, no tempo de vida dos organismos individuais, e estão geralmente associadas à fisiologia. A referência às causas próximas responde a questões como, por exemplo, a seguinte: “Como funciona o sistema circulatório de um mamífero?”

⁴⁴ Este ponto sobre a diferença entre os objetos das explicações etiológicas selecionistas e da análise funcional será abordado mais à frente, neste artigo.

⁴⁵ Caponi (2002) relaciona cada um dos modos de ‘explicar teleologicamente’ a uma regra metodológica subjacente. Assim, as explicações da biologia funcional formuladas em termos teleológicos estariam apoiadas na regra metodológica da adequação autopoietica, ao passo que as explicações da biologia evolutiva, na regra da adequação adaptativa. Quanto às explicações funcionais, ele afirma: “ter ou realizar uma função não poderá ser outra coisa senão possuir ou cumprir um papel causal na realização desta autopoiese” (Caponi, 2002, p. 73). De acordo com Caponi, a regra da adequação autopoietica está subordinada à regra da adequação adaptativa, um argumento similar ao de Mayr (2005), para quem a biologia evolutiva é o ramo da biologia que garante a esta ciência sua autonomia frente às outras ciências naturais.

Por sua vez, as investigações em biologia evolutiva recorrem às causas remotas dos fenômenos biológicos. A biologia evolutiva utiliza métodos comparativos com grande frequência, e, em relação à biologia funcional, se apóia menos no emprego de métodos experimentais. Para este ramo da biologia, o organismo é um elemento integrado em sistemas de organização maiores, como as linhagens e as populações. Deste modo, as causas às quais recorre para explicar um evento atual são eventos que tiveram lugar na história evolutiva da linhagem à qual pertence o organismo, na sua filogenia (Jacob, 1970, pp. 14, 186). Mayr (1988, p. 25) esclarece, em sua visão, quais as questões colocadas pela biologia evolutiva:

O biólogo evolutivo difere em seu método e nos problemas no qual ele está interessado. Sua questão básica é ‘Porque?’. Quando nós dizemos ‘porque’ nós devemos sempre estar cientes da ambiguidade deste termo. Ele pode significar ‘Como surgiu?’, mas também pode significar o finalístico ‘Para que?’. Quando o evolucionista pergunta ‘Porque?’ ele ou ela tem sempre em mente o ‘Como surgiu?’ histórico. (Mayr, 1988, p. 25)

A referência às causas remotas responde a estas questões do tipo ‘por quê?’. Tais questões, é importante ressaltar, solicitam a origem histórica de uma estrutura ou comportamento biológico. Isso as torna explicações etiológicas, como veremos em mais detalhes na próxima seção. Uma pergunta legítima que solicita explicação, neste campo, seria, por exemplo: “Por que mamíferos têm corações?”.

A perspectiva desenvolvida por Cummins captura bem os usos de função que têm lugar nas investigações em biologia funcional, na medida em que, através da análise funcional as causas próximas de capacidades que os sistemas vivos exibem são adequadamente explicadas. A abordagem deste filósofo sugere um papel para a noção de função segundo o qual, em vez de buscar-se causas históricas para explicar diacronicamente a existência de algum estado de coisas atual, propõe-se de modo sincrônico explicações das funções dos componentes de um sistema complexo a partir da análise de alguma capacidade que o sistema como um todo apresenta. Estas capacidades

sistêmicas são, em suma, explicadas analisando-as em termos de capacidades das partes componentes. Tais capacidades das partes são as funções para Cummins.

Por sua vez, Wright recorre às causas remotas dos fenômenos biológicos. Ele formula uma análise filosófica do raciocínio a que podemos recorrer para explicar a origem de um traço biológico atual nos organismos ou de certo artefato cultural humano. Assim, é fácil perceber que sua abordagem é potencialmente mais aplicável à evolução biológica⁴⁶, na medida em que oferece explicações de por que determinada estrutura biológica surgiu, ou, em outras palavras, relata sua etiologia, através de uma explicação narrativa selecionista.

Assumindo com base nos argumentos apresentados que há duas grandes áreas constituindo a biologia, enquanto ciência, temos mais facilidade em abandonar o desejo por unidade no que se refere às teorias sobre função. Este é o ponto central de nosso argumento ao fim desta seção. É possível que tal desejo de unificação seja, inclusive, um resquício ou reflexo do positivismo lógico, com sua ênfase sobre a busca por uma ciência unificada⁴⁷. Quanto a este ponto, parece-nos mais interessante seguir a Godfrey-Smith (1993, p. 207): “Ao menos permitamos aos filósofos fazer a coisa certa, quando analisamos a caracterização funcional: não permitamos que filósofo algum junte o que a ciência separou”.

Nestes termos, assumimos que há (pelo menos) dois modos de explicar funcionalmente, cada um pertinente a uma das duas áreas da biologia, conforme discriminadas por Mayr e Jacob. Ou, como sugeriu Caponi (2002), há duas teleologias (na explicação funcional e na explicação selecionista), uma para cada biologia, ainda que a dose de finalismo em uma seja menor do que na outra: “a explicação selecionista é teleológica em um sentido mais forte do que a explicação funcional” (Caponi, 2002, p. 82)⁴⁸. Ainda que Cummins (2002) mantenha, quanto a este ponto, posição diferente da de

⁴⁶ Wright parece adotar uma postura naturalizada, na qual, a partir de uma teoria biológica, o darwinismo ortodoxo, ele constrói uma abordagem geral sobre função que não é restrita ao mundo vivo, mas poderia ser aplicada a qualquer item, a um artefato qualquer. Assim, ainda que sua teoria derive da análise de explicações em biologia evolutiva, ela não se aplica somente a esta empreitada intelectual. Por derivar da concepção darwinista dominante no período, a teoria de Wright lança mão apenas da seleção natural como mecanismo da etiologia, não incorporando também outros elementos como as restrições desenvolvimentais. E nem poderia, na medida em que a importância da concepção de pluralismo de processos na biologia evolutiva começou a se tornar clara apenas após a publicação do artigo de Wright, em 1973.

⁴⁷ Conforme evidenciam a proposta de uma *Enciclopédia Internacional da Ciência Unificada*, de Otto Neurath, Rudolf Carnap e Charles Morris, entre outros filósofos do Círculo de Viena (ver Carnap, 1955).

⁴⁸ Esta posição de Caponi deriva de ele haver estabelecido uma relação entre a explicação em biologia funcional e o ‘princípio de adequação autopoietica’. Este autor constrói uma interessante linha de

Caponi⁴⁹, isso não afeta a legitimidade da dicotomia existente entre os dois campos da biologia e seus respectivos usos, tanto explicativos quanto metodológicos, do conceito de função⁵⁰.

3. A perspectiva de Larry Wright sobre as funções: a teoria padrão das abordagens etiológicas selecionistas

Wright ([1973]1998) desenvolveu uma abordagem explicitamente causal das funções, em termos do que ele chamou de etiologia da consequência (*consequence-etiology*). De acordo com ele, análises anteriores das atribuições funcionais, como as realizadas por Hempel (1959, *apud* Wright, [1973]1998), Canfield (1964), Sorabji (1964) ou Beckner (1969), apresentavam falhas por não contemplarem uma idéia que lhe parecia muito importante, a de que atribuições funcionais são também explanatórias. Em suas palavras,

Falar que algo, X, tem certa função é simplesmente oferecer um tipo importante de explicação de X. A falha em considerar isso, ou ao menos em não levá-lo a sério, é, eu acredito, responsável pela falha sistemática dessas análises em prover uma abordagem acurada das funções. (Wright, [1973]1998, p. 64).

Isso ocorria, segundo ele, porque tais análises não esboçavam qualquer distinção entre função e acidente. Esta distinção é, para Wright, fundamental e, de fato, contribuiu para um melhor entendimento do papel da noção de função na filosofia da biologia. É interessante notar, ainda, que a análise de Wright não está descolada da prática científica em biologia evolutiva, mas, ao contrário, a reflete em grande medida. Assim, podemos perceber que a distinção entre função e acidente, no contexto da teoria filosófica de Wright,

argumentação na defesa da legitimidade desta conexão, porém, uma avaliação detida destas idéias está fora dos limites da nossa argumentação no presente artigo.

⁴⁹ Cummins (2002) mantém uma distinção mais radical do que Caponi (2002). Para ele, sua análise funcional é um tipo de explicação essencialmente não-teleológica. Em sua visão, a teleologia sobrevive em sua forma atual (a neo-teleologia) apenas na biologia evolutiva ou em sua filosofia. Assim, os usos de função em biologia funcional estariam livres de compromissos teleológicos, desde o ponto de vista de Cummins.

⁵⁰ Esta visão dualista (ou pluralista) sobre as abordagens explanatórias utilizadas nas ciências biológicas está em consonância também com a interessante idéia de Sandra Mitchell (2003) de que há um pluralismo de modelos integrados cumprindo um papel no desenvolvimento da ciência.

corresponde a distinções similares em obras de biólogos evolutivos, como, por exemplo, aquelas entre efeitos ou benefícios fortuitos e adaptações genuínas, na obra seminal de G.C. Williams ([1966]1996), e entre exaptação e adaptação, feita por Gould & Vrba ([1982]1998)⁵¹.

Em seu artigo de 1973, Wright lança, de início, duas considerações básicas. Primeiro, atribuições de função explicam do mesmo modo que as atribuições de objetivo (*goal ascriptions*). Por exemplo, se dissermos que o cervo está correndo para fugir do predador, nós explicaremos *por que* o cervo está correndo. O mesmo vale para os casos funcionais. Se dissermos que o coração bate para fazer o sangue circular, estaremos oferecendo uma *explicação de por que* o coração bate.

A segunda consideração para sustentar o caráter explanatório das atribuições funcionais diz respeito à equivalência de contexto de diferentes tipos de perguntas, como as seguintes:

- (i) Qual a função de X?
- (ii) Porque Cs tem Xs?
- (iii) Porque Xs fazem Y? (Wright, [1973]1998, p. 65)

Todas estas perguntas solicitam, de acordo com Wright, a função de X e podem receber a mesma resposta. Solicitar a função de X, como fazem as questões acima, é – na visão de Wright – solicitar uma explicação para a existência de X. Desse modo, as atribuições funcionais devem ser tomadas como explicações.

Wright insiste que as atribuições de função precisam explicar em um sentido forte, já que interpretações mais fracas do significado de função não levam em conta a distinção função-acidente, para ele, fundamental. Por exemplo, a pergunta “Para que o fígado é bom?” não pode ser traduzida em “Por que animais têm fígados?” (ibid, p. 66). Notemos que a segunda pergunta exige uma explicação da existência de certo estado de coisas num âmbito restrito, particular. Tal explicação deve contar como uma atribuição de função ao fígado, enquanto a primeira pergunta (“Para que o fígado é bom?”) permite muitas

⁵¹ A obra de Williams ([1966]1996), ao lado da de Darwin ([1859]2002), foi, inclusive, uma das inspirações para Gould & Vrba ([1982]1998) proporem um novo termo para a biologia evolutiva, ‘exaptação’. Mais à frente, abordaremos a análise de Gould & Vrba. Ver também Godfrey-Smith (1993, p. 198).

respostas diferentes, as quais não precisam fazer uma distinção entre função e acidente para serem aceitáveis. De uma perspectiva histórica, é um acidente, de fato, que fígados sejam bons para serem comidos com cebola. No entanto, esta não é uma função do fígado no sentido pretendido, isto é, esta não é a razão que explica por que certos animais o possuem.

Desse ponto de vista, as atribuições/explicações funcionais podem ser ditas ‘etiológicas’, isto é, elas dizem respeito ao cenário causal que originou o fenômeno sob consideração. Wright trata, então, as explicações funcionais como explicações causais num sentido estendido. Porém, além de reconhecer o caráter causal das explicações funcionais, é necessário mostrar o que as torna diferentes das explicações causais ordinárias. Para isso, Wright lança mão mais uma vez da distinção função-acidente. De acordo com ele, todos os exemplos contrários a uma atribuição funcional que se baseiam em acidentes podem ser evitados “se incluirmos como parte da análise algo sobre como X chegou ali (onde quer que seja): isto é, que ele está ali porque ele faz Z – com um porquê etiológico.” (ibid, p. 66). Assim, ele propõe a seguinte forma para uma atribuição de função:

X está ali *por que* ele faz Z.

Ou

Fazer Z é a *razão* de X estar ali.

Ou

Que X faz Z é *o porquê* de ele estar ali. (Wright[1973]1998, p. 67, ênfase no original)

O autor ressalta que a presença do verbo fazer (*to do*) levanta algumas questões. Em alguns casos, a função de algo não é realizada, mas existe apenas em potência: “em alguns contextos, nós admitiremos que X faça Z embora Z nunca ocorra.” (ibid, p. 67). O que é exigido em tais atribuições funcionais, segundo Wright, é que “X seja capaz de fazer Z”. (ibid, p. 68). Ressalvas similares foram feitas por Hull, em sua análise de estados preferenciais para sistemas teleológicos:

Atingir ou manter certo estado preferido não é necessário para que um sistema seja teleológico. Em certos casos, um sistema que é claramente teleológico nunca

mantém o seu estado preferido, tal como no caso do esquema de controle da temperatura, que oscila em torno deste estado preferido. Em outros casos, o estado preferido nunca é alcançado e muito menos mantido. Pelo contrário, é abordado assintoticamente. Por exemplo, nenhuma espécie está sempre perfeitamente adaptada ao seu meio ambiente, embora algumas se avizinhem mais e com maior frequência desse ideal do que outras espécies. Ocasionalmente, um sistema teleológico atinge a sua meta, mas só uma vez. Finalmente, um sistema teleológico pode ser teleológico sem ser perfeito. Um sistema projetado para atingir uma meta pode deixar constantemente de fazê-lo por causa de uma leve falha em sua organização, situação denominada omissão de meta. Um torpedo disparado ainda seria um sistema teleológico mesmo que um defeito em seu dispositivo de disparo tivesse como resultado passar sempre ao largo do navio-alvo. (Hull, 1975, p. 153-4).

Uma argumentação muito similar é apresentada por Wright, quanto à necessidade destas ressalvas, as quais devem ser admitidas para que a condição (1) possa ser tomada como condição necessária para afirmar que Z é a função de X. Entretanto, como ele afirma, a fórmula acima não é suficiente para a definição de função. Isto porque a distinção causal/funcional é uma distinção entre etiologias, não entre etiologia e alguma outra coisa (ou seja, etiologia é algo compartilhado entre explicações causais comuns e funcionais). Logo, precisamos de outra condição, se quisermos diferenciar as etiologias funcionais das etiologias causais comuns e, assim, salvar o poder genuinamente explanatório das atribuições funcionais, algo que defende Wright.

Buscando uma definição suficiente de função, Wright analisa o caso do oxigênio e da hemoglobina, no qual, de acordo com ele, atribui-se função a algo indevidamente. Diz-se que o oxigênio se combina prontamente com a hemoglobina e que esta é a razão etiológica de ele ser encontrado na circulação sanguínea. Mas não é função do oxigênio combinar-se com a hemoglobina. A função do oxigênio é fornecer energia a partir das reações de oxidação. Combinar-se à hemoglobina é um meio para obter tal fim. Wright ([1973]1998, p. 69), referindo-se ao oxigênio, pretende mostrar de que maneira devemos entender o termo ‘porque’ na sentença “Ele está ali porque produz energia”. A compreensão do ‘porque’ nesta sentença deve ser significativamente diferente da

compreensão do mesmo termo nesta outra afirmação: “Ele está ali porque ele se combina com a hemoglobina”. De acordo com Wright, as duas explicações sugerem diferentes tipos de etiologias. Nós não poderíamos afirmar que o monóxido de carbono (CO), o qual é também capaz de se combinar com a hemoglobina, estaria no sangue porque é capaz de produzir energia.

Desse modo, é a própria natureza da etiologia que determina que há etiologias especificamente *funcionais*. Quando nós dizemos que a função de X é fazer Z, nós estamos dizendo que X está ali porque faz Z. Além disso, estamos explicando como X chegou ali, o que qualifica a explicação como etiológica. Porém, apenas certos tipos de explicações etiológicas explicarão funcionalmente. Isso reitera a necessidade de uma distinção entre duas etiologias: a causal e a funcional (*ibid.*).

Torna-se necessário, portanto, para completar a definição de função, fazer referência às conseqüências da presença de X. Obviamente, Z, sendo função de X, é também uma conseqüência de X, já que toda função é uma conseqüência, muito embora haja conseqüências que não sejam funções (sendo acidentes ou quaisquer outras coisas). Assim, ao fornecer uma explicação funcional de X apelando a Z, Z é sempre uma conseqüência ou um resultado de X estar ali. Ressalvas semelhantes àquelas feitas sobre o verbo ‘fazer’ na formulação de que X faz Z são feitas por Wright para esta segunda cláusula, que pretende completar a sua definição de função. Por exemplo, ao dizer que a fotossíntese é uma conseqüência da clorofila, deve-se permitir que algumas plantas verdes possam nunca vir a ser expostas à luz, sem que isso invalide a atribuição de função à clorofila destas plantas. Em outras palavras, devemos permitir os casos de omissão de meta, entre outros casos especiais (como apontamos acima na citação de Hull).

Assim, mediante a inclusão desta segunda cláusula, a saber, que “Z é uma conseqüência de X estar ali”, Wright propõe sua definição de função e, por conseguinte, estabelece sua fórmula de atribuição funcional:

A função de X é Z *significa* que:

- (a) X está ali porque ele faz Z,
- (b) Z é uma conseqüência (ou resultado) de X estar ali. (Wright, [1973]1998, p.

71, ênfase no original)

Enquanto a primeira parte da definição, (a), mostra a forma etiológica da atribuição/explicação funcional, a segunda parte, (b), descreve a convolução (*convolution*) que distingue etiologias funcionais de outras etiologias. Segundo Wright ([1973]1998), questões como “Por que ele está ali?” ou “O que ele faz?” freqüentemente se desdobram em “Que conseqüências ele tem que respondem por ele estar ali?”.

Wright assegura que sua análise é altamente recomendável pelo fato de que ela elucida o conceito de seleção natural, apesar de não se restringir a este tipo particular de seleção. A título de ilustração, vejamos um exemplo de explicação biológica no contexto desta formulação. A observação do comportamento de caça típico de um gato (*cat-like*) pode nos levar a perguntar por que os gatos caçam desta maneira. Uma resposta imediata pode ser: “Eles caçam assim por que é dessa maneira que conseguem caçar ratos e, em conseqüência, obtêm comida”. Entretanto não é a obtenção futura de certos ratos particulares que causa este tipo de comportamento num certo gato, na medida em que um evento no futuro não pode ter eficácia causal sobre um evento que o preceda. Não há qualquer inversão misteriosa de causalidade. Simplesmente, o gato pode se comportar de maneira típica e não alcançar o objetivo, a saber, obter ratos. Logo, não são eventos futuros, mas sim certos eventos passados de captura de ratos que rendem aos gatos hoje a capacidade de comportar-se de uma maneira típica.

Assim, aplicando a formulação geral de função de Wright a este caso (mantendo claro, todas as ressalvas admitidas acima), podemos dizer que a função do comportamento típico de caça dos gatos, C, é obter alimentos, O, se,

- (i) C está ali porque ele faz O
- (ii) O é uma conseqüência (ou resultado) de C estar ali.

Logo, O é a conseqüência da presença prévia de C, que o manteve nas linhagens de gatos. Isso significa que, em determinado momento da história evolutiva desta linhagem, obter ratos passou a ser uma conseqüência especial da realização do comportamento C, já que certos organismos, por possuírem o comportamento C, obtinham com maior freqüência o objetivo O. Estes apresentavam, assim, uma vantagem seletiva sobre os outros indivíduos da mesma espécie que não possuíam este comportamento, ou possuíam um comportamento

similar, mas não tão eficiente. A vantagem de obter mais alimentos aumentou, então, as chances de reprodução e sobrevivência de certa variante de gatos no passado. Isso manteve o comportamento C na espécie, que é instanciado hoje por gatos particulares. Portanto, de modo simplificado, a vantagem seletiva de fazer C no passado, i.e., seu sucesso na obtenção de O, causa a instanciação de C nos gatos atuais.

A análise de Wright nos oferece uma fórmula curta e elegante para as atribuições funcionais que têm lugar em biologia evolutiva, em contraste com as definições de função apresentadas pelos filósofos anteriores. Além disso, ela tem um forte apelo, por ser capaz de fornecer uma boa distinção entre função e acidente. A demonstração da necessidade de tal distinção para a análise das explicações em biologia evolutiva representa um avanço em filosofia da biologia que não pode ser negligenciado. Por vezes, as críticas dirigidas – corretamente – a algumas falhas da abordagem de Wright são tão incisivas que perdem de vista a importância da distinção função/acidente. Para notar a importância de tal distinção, basta notar que ela se mantém, por vezes como algo tácito, nas teorias etiológicas seletivas desenvolvidas posteriormente por outros filósofos (como Millikan, [1989]1998, Godfrey-Smith, [1994]1998 e Griffiths [1993]1998).

Porém, não se pode perder de vista que há importantes problemas com esta perspectiva teórica. Pode-se legitimamente levantar muitas objeções às abordagens etiológicas de função (como o caráter fortemente seletivista destas), das quais a análise de Wright pode ser considerada a pioneira. Na próxima seção, nos debruçaremos sobre estas objeções, sobretudo aquelas levantadas por Cummins, em sua crítica ao que ele chamou de ‘neo-teleologia’.

4. A neo-teleologia

No seu trabalho mais recente sobre explicações e atribuições funcionais na biologia, *Neo-teleology*, Cummins (2002) sugere que há dois tipos de explicações que recorrem a ‘função’: a explicação teleológica e a análise funcional. Ele propõe que apenas o segundo tipo, uma abordagem defendida por ele, captura realmente aspectos importantes da prática de investigação biológica, ao passo que o primeiro tipo, as explicações teleológicas, apesar de ainda existirem na biologia, ou ao menos em sua filosofia, devem ser condenadas à

extinção (ibid, p. 157). O que Cummins chama de ‘teleologia’ é a idéia de que o apelo à função, ao objetivo ou ao propósito de algum item, digamos, X, pode explicar por que X existe ou está presente. Para Cummins (2002, p. 160) “a teleologia sobrevive contemporaneamente na biologia evolutiva, ou ao menos em sua filosofia” na forma do que ele denominou ‘neo-teleologia’, expressão cunhada pelo próprio autor, que indica

a tese substantiva de que, em alguns tipos importantes de casos, a função de uma coisa – o efeito que nós identificamos como sua função – é uma pista para sua existência. [...] a neo-teleologia deve ser a idéia de que, por exemplo, há olhos porque eles permitem a visão, asas porque elas permitem o vôo, e polegares opositores por que eles permitem agarrar. (Cummins, 2002, p. 161)

Cummins, define ainda a neo-teleologia através de um exemplo. Ela designa a tese de duas partes (usando o exemplo clássico da função do coração) segundo a qual:

(i) nós temos corações por causa do que corações são para: corações são para a circulação do sangue, não para a produção de um pulso, então, corações existem – animais os têm – porque a função deles é circular o sangue, e (ii) que (i) é explicado por seleção natural: traços aumentam suas frequências nas populações [*spread*] por causa de suas funções. (Cummins, 2002, p. 157).

Assim, em termos gerais, a explicação neo-teleológica busca dar conta da presença ou da existência de um traço ou comportamento biológico através de um apelo à sua função. Cummins aponta como representantes da neo-teleologia proeminentes filósofos da biologia contemporâneos, como Godfrey-Smith ([1994]1998), Griffiths ([1993]1998), Neander ([1991]1998) e Millikan ([1989]1998). Embora não seja citada por Cummins como uma abordagem neo-teleológica, a teoria de Wright compartilha os princípios atribuídos por ele à neo-teleologia. Mais do que isso, a abordagem de Wright foi a pedra fundadora das abordagens etiológicas selecionistas na filosofia da biologia do pós-guerra, tendo exercido grande influência sobre as idéias dos autores citados por Cummins como neo-teleologistas (Hull, 2002; Godfrey-Smith, 1993). De acordo com Cummins,

uma defesa de uma abordagem etiológica seletcionista das funções é, com efeito, uma defesa da neo-teleologia, já que as abordagens seletcionistas igualam atribuições funcionais com o que eu estou chamando de explicações neo-teleológicas: dizer que a função do coração é circular o sangue, nestas abordagens, é oferecer uma explicação neo-teleológica da presença de corações. (Cummins, 2002, p. 162).

Como vimos na seção anterior, este é precisamente o uso de função no âmbito da abordagem etiológica de Wright. É razoável, portanto, tratar, a partir de argumentos do próprio Cummins, a abordagem de Wright como uma perspectiva essencialmente neo-teleológica.

A neo-teleologia, segundo Cummins, apesar de, pelo menos aparentemente, gozar de boa reputação na biologia ou em sua filosofia, mantém laços estreitos com a teleologia clássica, como a de Paley (Cummins, 2002). Esta última constitui, para Cummins, um quadro teórico tão natural quanto antigo para pensar sobre artefatos, como utensílios de cozinha, ferramentas de trabalho etc. Tal forma de ver produtos da cultura humana se estende facilmente a partes do nosso corpo (os olhos são instrumentos para ver) e, por fim, aos objetos naturais em geral (o objetivo dos corações de vertebrados é fazer o sangue circular; o objetivo das pedras é cair porque o chão é o seu lugar natural). Desse modo, a referência ao objetivo passa a ser entendida como o que explica por que tais coisas existem.

Se ter uma função é o que explica por que algo existe, então – sugere Cummins – “deve haver alguma história [*story*] de fundo sobre um mecanismo ou processo que produz os itens em questão, e os produz por causa de suas funções.” (Cummins, 2002, p. 159). Cummins chama este mecanismo, que gera o ítem da atribuição funcional, de processo de base (*grounding process*), sendo este, segundo ele, o ponto fraco da neo-teleologia, como veremos a seguir.

Ao longo da história da ciência, foram propostos diferentes mecanismos como processos de base para as explicações teleológicas. Explicações teleológicas do movimento foram abandonadas porque o apelo à função nestes casos se mostrou supérfluo. Cummins recorre ao exemplo da astronomia Ptolomaica para explicar este ponto:

... se uma estrela tem seu movimento aparente porque ela está ligada a uma esfera rígida em movimento, centrada na Terra, ela irá traçar uma órbita circular ao redor do centro da esfera independentemente de qual possa ser sua função. (Cummins, 2002, p. 159-160).

Nestes casos, a explicação tem um caráter nomológico, e não funcional, isto é, ela deve recorrer às leis físicas pertinentes, juntamente com as condições iniciais, para explicar a ocorrência do evento particular em questão, e não ao seu propósito ou objetivo⁵².

Explicações teleológicas do crescimento e desenvolvimento que recorriam a forças ocultas, como enteléquias, presentes no pensamento de Aristóteles e Hans Driesch, por exemplo, também foram abandonadas, porque não ofereciam a possibilidade de encontrar o processo de base (*cf.* Cummins, 2002, p. 159). A própria natureza destas empreitadas tornavam inacessíveis empiricamente os processos que engendrariam os itens da atribuição funcional. Além disso, o surgimento e o avanço da biologia molecular acabaram por eliminar da biologia o pensamento vitalista, na medida em que as explicações vitalistas e moleculares passaram a competir pelo mesmo território. Assim, o vitalismo em declínio acabou por levar consigo as explicações teleológicas do desenvolvimento, que apelavam a fatores extra-naturais.

O forte apelo da neo-teleologia, defende Cummins, está no fato de que ela coloca a seleção natural como seu processo de base. A seleção natural, um mecanismo que goza de boa reputação entre biólogos e filósofos da biologia (Dennett, 1995), é responsável, para os neo-teleologistas, pela criação e pelo aumento de frequência [*spread*] dos itens da atribuição funcional (como a abordagem de Wright evidencia). Ela acaba por eliminar a necessidade de um criador sobrenatural ou de forças ocultas como as enteléquias e é exatamente nisto que reside seu poder de atração. Desse modo, como defendem uma estratégia selecionista, os neo-teleologistas propõem que os traços nos organismos são selecionados por causa dos efeitos que contam como suas funções e, portanto, existem nos organismos porque têm as funções que realizam. Para Cummins, o conceito de ‘função’

⁵² Um trabalho clássico sobre explicações nomológicas é Hempel & Oppenheim (1948), para onde encaminhamos o leitor. Para mais informações sobre explicações em geral, ver Salmon (1990).

tem um papel legítimo na prática científica (conforme veremos na seção seguinte), mas a neo-teleologia não captura, com suas explicações selecionistas, um papel legítimo para este conceito. Como coloca Cummins “traços, mecanismos, órgãos biológicos etc. não existem por causa de suas funções. Eles existem por causa de suas histórias de desenvolvimento” (ibid, p. 162). Para ele, os processos que produzem os traços biológicos são insensíveis à função dos traços, do mesmo modo que o apelo a função nos processos de base da mecânica teleológica são supérfluos, pois estes processos são insensíveis a função. Sendo assim, função não pode ser usada para explicar a existência dos traços biológicos.

A neo-teleologia careceria de justificação não somente para explicar a origem dos traços, mas também o aumento da frequência destes, uma vez que, de acordo com Cummins “o problema fundamental com a neo-teleologia é que traços não se tornam mais comuns [*spread*] por causa de (efeitos que contam como) suas funções” (Cummins, 2002, p. 164). Para Cummins, a neo-teleologia, quando apela à função para explicar a origem e o aumento de frequência dos traços, transmite uma visão equivocada sobre o mundo vivo e sua evolução. A seguir, analisaremos em maiores detalhes os argumentos oferecidos por Cummins para sustentar esta tese, que lança então uma pergunta embaraçosa para o neo-teleologista: “Se os processos que produzem os traços são insensíveis às funções dos traços, como podem funções dar conta de por que um traço está ‘ali’, i.e., é expresso em alguma população específica?.” (ibid, p. 163) De acordo com ele, a resposta do neo-teleologista segue nos seguintes termos: O neo-teleologista reconhece, sem problemas, que os processos que produzem os traços são insensíveis às suas funções, na medida em que, naturalmente, traços não têm funções até que sejam produzidos. Mas eles argumentam que os processos que preservam os traços e fazem sua frequência aumentar numa população são, estes sim, sensíveis às funções dos traços. Então, aparentemente, o neo-teleologista terá encontrado um processo de base adequado, satisfatório e que não parece carecer de legitimidade. Nesta linha de raciocínio, a elucidação do mecanismo de aumento da frequência do traço dá uma indicação de como ele surgiu. E assim, à primeira vista, os problemas parecem ter sido superados pelo neo-teleologista. Mas não o são, como veremos a seguir.

4.1 Dois tipos de neo-teleologia

Em busca de representar com mais fidelidade as posições assumidas pelos autores que ele considera ‘neo-teleologistas’, Cummins faz uma distinção entre duas formas de neo-teleologia: a forte e a fraca. A variante forte diz que *qualquer* traço biológico que tem uma função foi selecionado positivamente porque desempenhava aquela função. Já a versão fraca sustenta uma tese mais plausível, a de que apenas *alguns* traços foram selecionados por causa de suas funções. Vejamos em mais detalhes como Cummins analisa estas duas versões da neo-teleologia.

A neo-teleologia forte dificilmente se sustenta. Ela é, de fato, mais vulnerável do que a versão fraca, razão pela qual Cummins se detém muito mais nas críticas àquela versão. Como se pronuncia sobre todos os traços biológicos, a apresentação de apenas um contra-exemplo é suficiente para justificar sua rejeição. Como coloca Cummins, “a neo-teleologia forte é refutada se existem alvos legítimos da caracterização funcional que não são alvos da seleção” (Cummins, 2002, p. 165). E, com base nesta premissa, conclui que “a neo-teleologia forte deve ser rejeitada, já que a maioria, se não todas, das estruturas complexas, como corações, olhos e asas, têm evidentemente funções, mas não foram selecionadas por causa de (do efeito que conta como) suas funções” (Cummins, 2002, p. 165).

Não é difícil perceber, a partir da crítica de Cummins, uma falha crucial das abordagens etiológicas selecionistas (dentre as quais, a de Wright), isto é, a de que elas são muito dependentes de processos de seleção. Elas se expõem, assim, facilmente a acusações de selecionismo estrito, ou seja, de não considerar o papel de outros fatores nos processos evolutivos relacionados à origem de traços, como, por exemplo, a deriva gênica e as restrições. Isso porque atribuem à seleção (natural ou artificial) o poder de determinar por que algo existe. Este quadro teórico não permite responder *sempre* “por que algum item biológico existe”, já que um item pode existir sem ter sido selecionado favoravelmente. Podem ser apontados casos em que a razão de algo existir ou estar presente num certo lugar não é sua função, mas uma mera casualidade. Como bem apontou Cummins, uma depressão em forma de bacia em uma grande pedra pode ter a função de conter água benta, mas não se pode explicar por que ela está ali apelando para sua função, se soubermos que ela foi produzida por atividade glacial (Cummins, [1975]1998). Conter água benta é muito mais uma disposição da depressão do que algo que explique sua origem.

Idéias expressas por Gould e Vrba ([1982]1998) também apontam nesta direção. De acordo com eles, nem todas as características que aumentam o *fitness* ou a aptidão darwiniana (que eles denominam ‘aptações’) são produtos de seleção natural. Grande parte dos caracteres surge e evolui sem nenhuma função ou tendo outras funções no passado, sendo depois ‘cooptados’ para um papel diferente. Gould e Vrba sugerem que esses caracteres sejam chamados de ‘*exaptações*’. Segundo eles, as adaptações têm função, enquanto as *exaptações* têm efeitos que, ao contrário das funções, são conseqüências fortuitas de sua presença. Nessa abordagem, a ênfase recai sobre os casos em que uma estrutura surge inicialmente numa linhagem não necessariamente por seleção, com uma função determinada. Porém, ao longo da história evolutiva, o traço que tinha a função X pode assumir outra função, digamos, Y. Assim, Gould e Vrba (*ibid.*) destacam, como ponto central de seus argumentos, a importância de casos em que os usos original (X) e atual (Y) de um traço divergem. Estes são também casos em que as forças seletivas que constroem e que mantêm um traço atuam em direções diferentes, o que mostra a pertinência dos argumentos de Cummins contra a identidade estabelecida pelo neo-teleologista entre os alvos da seleção e os alvos da atribuição funcional.

Godfrey-Smith também percebeu a divergência entre os usos original e atual dos traços, o que o levou a formular sua ‘teoria da origem moderna das funções’. Godfrey-Smith ([1994]1998) se propõe a resolver, com sua teoria, uma falha na abordagem desenvolvida por Wright ([1973]1998), a de que ela não oferece uma indicação de quão longe temos de voltar no passado para reconstruir a etiologia de um traço atual de um organismo, cuja presença ou existência se deseja explicar. Godfrey-Smith ([1994]1998) pretendeu resolver o problema limitando a busca da etiologia sempre à história recente do traço.

Tomemos o exemplo das penas, que surgiram nos dinossauros, antes do aparecimento das aves. De acordo com os modelos atualmente mais aceitos, elas foram inicialmente selecionadas para a função de isolamento térmico em dinossauros ancestrais das aves. Entretanto, posteriormente, elas foram cooptadas para o voo, o que terminou por resultar na seleção posterior de mudanças em características das próprias penas, em características esqueléticas e padrões neuromotores específicos. Assim, dizemos que as

penas foram exaptadas para o voo (para maiores detalhes, ver Sepúlveda & El-Hani, no prelo; Ostrom, 1974, 1979; Prum & Brush, 2003).

Da perspectiva de Godfrey-Smith ([1994]1998), para explicar por que as aves atuais têm penas, deveríamos recorrer apenas à história recente, onde a razão para a manutenção destes itens está relacionada às contribuições destas para o voo. Estaria excluída da explicação etiológica, neste caso, a narrativa histórica mais antiga, na qual penas surgem e se mantêm nas populações por conta de seus efeitos termorregulatórios.

Entretanto, apesar de sua sugestão interessante, Godfrey-Smith não escapa às críticas de Cummins dirigidas contra a neo-teleologia, porque sua abordagem continua a compartilhar com a abordagem de Wright (como, de resto, com todos os neo-teleologistas) as importantes falhas apontadas por Cummins. A premissa básica do neo-teleologista, de fazer uso da noção de função para explicar por que algo existe ou está presente, também é assumida por Godfrey-Smith.

Outra razão para sustentar a mesma tese é oferecida por Cummins:

Melhores *designs* de asa não precisam melhorar o voo, mas simplesmente torná-lo mais eficiente, ou tornar o desenvolvimento menos propenso a erro, ou tornar a estrutura menos frágil. Conseqüentemente, mudanças selecionadas no *design* da asa que se acumulam para produzir o *design* atual que nós buscamos explicar não precisam estar relacionadas à função da asa. De fato, eles podem até mesmo comprometer o voo no interesse de outros fatores. (Cummins, 2002, p. 168)

Apesar de não ser evidente de que modo a expressão “torná-lo mais eficiente” usada por Cummins, se diferencia de “melhorar o voo”, há um sentido no qual a posição geral de Cummins é apropriada. O sentido é o de que um traço não precisa favorecer a sobrevivência ou reprodução diferencial do organismo portador para ser selecionado. Em outros termos, o equívoco da neo-teleologia forte está, em suma, em estabelecer uma identidade entre o alvo da seleção e o alvo da atribuição funcional. Como há casos em que o que é selecionado não o é por causa de sua função, ou seja, em que o alvo da seleção não é o mesmo da atribuição funcional, a versão forte da neo-teleologia deve, em nosso entendimento, ser de fato rejeitada.

Vejam os a razão apontada por Cummins para a rejeição da neo-teleologia forte, através de uma análise da função do coração. Para que a abordagem da neo-teleologia forte seja legítima, seria necessário haver, numa população biológica, uma subpopulação cujos indivíduos possuíam coração, e outra subpopulação, de indivíduos que não possuíam coração. Desta perspectiva, a subpopulação com coração seria selecionada. E, se somente é possível atribuir função ao que foi selecionado (para o neo-teleologista), então, o alvo da seleção coincidiria com o alvo da atribuição funcional.

Cummins, por sua vez, separa – corretamente, do nosso ponto de vista – o alvo da atribuição funcional do alvo da seleção. Para ele, na medida em que a seleção opera sobre variações na eficiência de estruturas biológicas que devem cumprir certa tarefa, a atribuição funcional deve dirigir-se a todos os indivíduos da população, sem exceção. Além disso, nem todos os indivíduos serão selecionados favoravelmente. Apenas serão selecionados os melhores competidores. Logo, o alvo da seleção é um subconjunto do alvo da atribuição funcional⁵³.

A neo-teleologia fraca, por sua vez, pode sobreviver a esta objeção, na medida em que, de acordo com ela, nem todos os traços que foram selecionados o foram por causa de suas funções. Mais adiante, na seção 6, retornaremos ao que vemos como uma falha da crítica de Cummins a esta versão da neo-teleologia.

Por ora, continuemos com as críticas pertinentes de Cummins à neo-teleologia. Para Cummins, o neo-teleologista pode tentar salvar o poder explanatório das funções, a partir do estabelecimento de uma identidade entre ter uma função e ser adaptativo (ver Cummins, 2002, pp. 166-ss). Porém, isto não resolve o problema essencial da neo-teleologia forte, apontado por Cummins. Trata-se de uma tentativa de passar ao largo do problema, mas não exatamente de apresentar uma solução consistente a ele. Como corretamente aponta Cummins, ter uma função não é o que impele a seleção, mas sim funcionar melhor do que o competidor – também conforme a avaliação de Caponi (2002, p. 77). Por exemplo, a

⁵³ Cummins (2002) não define de maneira rigorosa o que entende por “alvo da seleção” e por “alvo da atribuição funcional”. A partir da leitura de seu texto nos parece razoável depreender que alvo da atribuição funcional indica o conjunto de todos os organismos que possuem os itens aos quais atribuímos função (no nosso exemplo específico, o coração). Já o alvo da seleção seria o conjunto dos organismos que possuem apenas os itens mais adaptativos (no exemplo, os corações mais adaptativos). De qualquer modo, o ponto importante em nosso argumento diz respeito à necessidade de distinguir do modo como faz Cummins, e diferentemente da neo-teleologia, o que é selecionado do que é funcional.

melhor e a pior asa têm a mesma função, mas só a primeira se tornará mais comum na população. Em outros termos, são variações na função de algo que interessam para a adaptatividade, não a ausência ou presença da função, como argumenta Cummins. Ou seja, somos levados por outra via à mesma conclusão: o alvo da caracterização funcional não é o mesmo da seleção.

Um outro aspecto no qual a neo-teleologia falha é apontado por Cummins. Trata-se do modo como ela constrói uma explicação focada apenas no item da atribuição funcional e perde de vista a “economia orgânica”, a visão do sistema do qual o item é parte, e sobre o qual agirá, na maioria dos casos, a seleção natural. De acordo com Cummins:

Se nós estamos tentando entender por que um dado traço ou estrutura é do jeito que nós o encontramos, nós não podemos simplesmente focar sobre variações que afetam quão bem aquele traço ou estrutura desempenha sua função. Nós precisamos, ao invés disso, olhar para a economia complexa da unidade inteira de evolução. Isso é precisamente o que uma análise funcional da unidade inteira facilita, e é negligenciado quando nós focamos sobre a função ou funções do traço em questão. (Cummins, 2002, p. 168).

Aqui, o argumento de Cummins está de acordo com a crítica ao adaptacionismo de Gould & Lewontin ([1978]1994). Para estes últimos, o adaptacionismo constrói uma história explicativa dos traços organísmicos e, assim perde de vista um aspecto importante do processo evolutivo: de que é o organismo, e não suas partes, que é selecionado e deixa descendentes na próxima geração⁵⁴.

Vejamos a seguir como a análise funcional poderia capturar a “economia orgânica”, da perspectiva de Cummins.

5. A análise funcional de Cummins

⁵⁴ Para maiores detalhes ver Gould & Lewontin (1979) e Rosenberg & McShea (2008, p. 65 e subsequentes), onde os argumentos de Gould & Lewontin contra o adaptacionismo, são discutidos.

A partir deste ponto, passaremos a examinar o modelo proposto por Cummins, a análise funcional⁵⁵. Este modelo foi apresentado por ele no artigo *Functional Analysis* de 1975 e nos dois primeiros capítulos de seu livro *The Nature of the Psychological Explanation* (1983). Em primeiro lugar, devemos notar, que – *contra* Wright – Cummins ([1975]1998) considera que as explicações funcionais podem ser realizadas, na biologia, de maneira independente de considerações evolutivas: “uma capacidade complexa de um organismo [...] pode ser explicada mediante apelo a uma análise funcional, independentemente de como essa capacidade se relaciona à capacidade do organismo de manter a espécie” (ibid, p. 182). Ele reitera este ponto ao afirmar que a “análise funcional é anterior a, e independente de, avaliações de adaptatividade” (Cummins, 2002, p. 167).

Para Cummins, como já apontamos acima, as abordagens sobre funções que antecederam à sua própria, teriam sido mal orientadas, devido à sua insistência em considerar a função como algo que explica a existência ou presença do item organísmico sob consideração. Em suas palavras, tal apelo à noção de função “[...] é um ato de desespero nascido do pensamento de que não há outro uso explicativo para a caracterização funcional na ciência” (ibid., p.175).

Assim, ele busca abordar o assunto de uma perspectiva diferente das abordagens etiológicas selecionistas, a saber, em termos de disposições e capacidades complexas, enquadrando sua teoria numa perspectiva sistêmica do mundo. Por exemplo, para Cummins ([1975]1998), se algo funciona como uma bomba em um sistema *s*, ou se a função de algo em um sistema *s* é bombear, então ele deve ser capaz de bombear em *s*. Deste modo, enunciados atribuidores de função implicam enunciados disposicionais; ou seja, atribuir uma função a algo é, ao menos em parte, atribuir uma disposição a este algo. Por exemplo, se a função do vacúolo contrátil em protozoários de água doce é eliminar excesso de água do organismo, então deve haver circunstâncias sob as quais o vacúolo contrátil realmente manifestaria uma disposição para eliminar excesso de água do protozoário que o incorpora.

⁵⁵ A análise funcional de Cummins tem recebido diferentes nomes. Constituem algumas denominações correntes na literatura: “análise do papel intrasistêmico” (Johansson, 2006, p. 35), “teoria do papel causal” (Wouters, 1999, p. 19), “abordagem do papel causal” (Rosenberg & McShea, 2008, p. 90) e “abordagem sistêmica” (Wouters, 2005, p. 125). Aqui, utilizamos simplesmente a expressão do próprio Cummins, “análise funcional”, compreendendo, ao mesmo tempo, que esta se enquadra numa visão sistêmica sobre os fenômenos do mundo natural.

Desta perspectiva, atribuir uma disposição d a um objeto a é afirmar que o comportamento de a está sujeito a certa regularidade legiforme. Dizer que a tem d é dizer que a manifestaria d (por exemplo, dissolver-se, dilatar-se, elevar-se) caso ocorressem condições suficientes para tal. Assim, a se comporta de modo a apresentar d sempre que colocado sob certas condições. Associada à disposição, há, segundo Cummins, uma “regularidade disposicional legiforme” (*law-like regularity*). Estas são regularidades observadas no comportamento de um tipo de objeto em virtude de alguns fatos especiais a seu respeito. Por exemplo, nem tudo é solúvel em água. As coisas que o são, porém, se comportam de uma determinada maneira em virtude de uma característica especial, típica das coisas solúveis em água. E, para Cummins, o que deve ser explicado é exatamente esta regularidade disposicional. Logo, explicar uma regularidade disposicional é explicar como manifestações da disposição são causadas, dadas as condições precipitantes. Cummins descreve duas estratégias para realizar esta explicação: (i) a estratégia da instanciação e (ii) a estratégia analítica.

A aplicação da estratégia da instanciação consiste na subsunção de um caso particular, no qual um objeto manifesta certa disposição, a uma regularidade disposicional legiforme. Por exemplo, podemos explicar desta forma a disposição de uma barra de ferro de dilatar-se mediante o aumento de temperatura. Neste caso, a explicação se dá através da aplicação de uma regularidade legiforme relativa à dilatação (digamos, a lei da dilatação linear dos corpos), associada a informações sobre o objeto particular em questão, como seu coeficiente de dilatação linear, a variação de temperatura a que o objeto foi submetido, a variação de seu comprimento etc. (Tipler, 2000, p. 586). Em outras palavras, a regularidade legiforme subsume o caso particular em questão e, em associação com as condições iniciais particulares, explica a manifestação da disposição no objeto⁵⁶.

A estratégia analítica procede de um modo diferente da estratégia anterior. Em vez de derivar uma regularidade disposicional que especifica d (em a) dos fatos da instanciação de d (em a), no âmbito da estratégia analítica, procedemos a uma análise da disposição de d presente em a em uma série de disposições d_1, d_2, \dots, d_n apresentadas por componentes de a , de modo que a manifestação das d_i resultam na, ou levam à, manifestação de d . Cummins

⁵⁶ Conforme o modelo dedutivo-nomológico da explicação científica de Hempel & Oppenheim (1948).

pretende que as duas estratégias que propôs se juntem numa abordagem unificada, caso as disposições analisadoras (d_1, d_2, \dots, d_n) possam ser explicadas por meio da estratégia de instanciação.

Após a apresentação da estratégia analítica, Cummins propõe uma mudança de terminologia: “Quando a estratégia analítica está em perspectiva, se está apto a falar de capacidades (ou habilidades) mais do que de disposições.” (Cummins, [1975]1998, p. 187). Isso porque, de acordo com ele, freqüentemente explicamos uma capacidade por meio de sua análise. Ele oferece um exemplo, de uma linha de montagem, que ilustra bem como a estratégia analítica pode capturar um uso adequado do termo ‘função’ em diversas ciências. A produção numa linha de montagem é dividida em várias tarefas distintas. A capacidade da linha de produzir o produto se deve à capacidade de cada ponto ou componente da linha de realizar certas tarefas (*ibid. id.*). Se estas tarefas são realizadas de um modo organizado, o resultado é o produto final. Assim, para Cummins, explicamos a capacidade da linha de montagem de produzir o produto apelando às capacidades dos componentes da linha de realizar suas tarefas específicas. O exercício, por certo componente, de sua capacidade específica é sua função na linha. Ou seja, a função de um componente da linha, para Cummins, é o que quer seja que ele faça ao qual nós apelamos para explicar a capacidade da linha como um todo⁵⁷.

A proposta de Cummins pode ser melhor compreendida se for colocada em contraste com a visão neo-teleológica. Em primeiro lugar, devemos notar, conforme aponta Cummins, que

enquanto a teleologia busca responder à questão por que-ele-está-ali respondendo à questão anterior o-que-ele-é-para [*what-is-it-for*], a análise funcional não se dirige

⁵⁷ É interessante notar que Cummins, referindo-se ainda ao exemplo da linha de montagem, lança mão, também, da noção de ‘programa’. Em seu livro de 1983, ele afirma: “[...] a manifestação programada das capacidades analisadoras resulta na manifestação da capacidade analisada. Por ‘programado’ aqui, eu simplesmente quero indicar organizado de certo modo que possa ser especificado em um programa ou fluxograma. A produção numa linha de montagem oferece uma ilustração transparente.” (Cummins, 1983, p. 28). Por recorrer à noção de programa, parece-nos interessante investigar se seria possível uma conciliação entre a análise funcional de Cummins e a perspectiva teleonômica desenvolvida por Mayr (1988, 2005). Entretanto, aqui estamos apenas apontando para um possível tema de pesquisa, não sendo este o caminho que seguiremos neste artigo.

de modo algum à questão por que-ele-está-ali, mas à questão como-ele-funciona. (Cummins, 2002, p. 158)⁵⁸.

Em segundo lugar, diferentemente do que ocorre na abordagem de Wright (como, de resto, em todos os autores neo-teleologistas), na qual os alvos da atribuição funcional e da explicação funcional são os mesmos (ver Cummins, 2002, p. 161-2) – ou seja, atribuir função a algo é explicá-lo funcionalmente – em Cummins, explicação e atribuição funcional não coincidem, porque não se dirigem aos mesmos alvos. Para este autor, enquanto atribuímos *função* a um *componente do sistema*, o *alvo da explicação* é uma *capacidade deste sistema continente*.

Isso nos leva a perceber a mudança de foco que propõe Cummins em sua análise funcional, com relação às abordagens etiológicas de função. Para ele, o *explanandum* não é a existência ou presença de certo item (como propõe Wright), mas sim uma capacidade (que desejamos compreender) de um sistema complexo. Em suma, função é algo a que nós apelamos para explicar a capacidade de um sistema continente, não para explicar por que algum item existe em tal sistema⁵⁹.

Estamos diante, portanto, de um outro quadro teórico que captura bem o significado de muitas explicações nas ciências biológicas. Por exemplo, as capacidades biologicamente significativas de um organismo são corriqueiramente explicadas por biólogos através da análise do organismo em vários subsistemas (sistema circulatório, respiratório etc.). Cada um destes sistemas tem suas capacidades características, as quais são, por sua vez, analisadas em capacidades dos órgãos que os compõem. Este procedimento analítico continua até que “as capacidades analisadoras sejam tratáveis pela estratégia da instanciação” (Cummins, [1975]1998, p. 188). A estratégia da instanciação começa onde não faz mais sentido aplicar a estratégia analítica. Este é o modo como Cummins propõe que a estratégia analítica e a estratégia da instanciação podem se conectar, integrando-se

⁵⁸ Esta avaliação de Cummins reforça, inclusive, o argumento em prol do pluralismo de modelos sobre funções que apresentamos na seção 2 deste artigo, na medida em que apóia a tese de que sua teoria e a de Wright tem diferentes *explananda*.

⁵⁹ Logo, mesmo os efeitos das partes do sistema que, na visão de Wright, seriam acidentes podem ser usados na análise funcional de Cummins para explicar a realização de uma capacidade complexa do sistema do qual este componente é parte. Tudo o que é exigido, da perspectiva analítica de Cummins, é que a capacidade da parte contribua para a realização da capacidade sistêmica, seja ela função ou acidente, nos termos de Wright ou de outros autores neo-teleologistas.

numa abordagem explanatória unificada, que atravessa diversos níveis de organização hierárquica.

Cummins explicita, então, sua abordagem analítica (que, de fato, já se encontra implícita na prática científica), formalizando-a do seguinte modo:

[...] x funciona como Φ em s (ou: a função de x em s é Φ) relativamente a uma abordagem analítica A da capacidade de s de Ψ , apenas caso x seja capaz de fazer Φ em s e A dê conta, apropriada e adequadamente, da capacidade de s para Ψ em parte mediante um recurso à capacidade de x para Φ em s. (ibid, p. 190).

Para Cummins (ibid.), o interesse explanatório de uma abordagem analítica é proporcional a: (i) o grau em que as capacidades analisadoras são menos sofisticadas do que as capacidades analisadas; (ii) o grau em que as capacidades analisadoras são de tipo diferente das capacidades analisadas; e (iii) a relativa complexidade de organização das partes/processos componentes do sistema. Essas considerações nos levam ao seguinte ponto: quanto maior a diferença de sofisticação entre as capacidades analisadoras e as capacidades analisadas, mais sofisticada precisará ser a análise, para que esta lacuna seja preenchida. Nos casos em que essa diferença é pequena, a estratégia da instanciação parece mais adequada e, nestes casos, falar em função parece não ter muito sentido. Como afirma Cummins:

Deve ser admitido, entretanto, que não há qualquer distinção preto ou branco aqui, mas um caso de mais ou menos. À medida que o papel da organização se torna menos e menos significativo, a estratégia analítica se torna menos e menos apropriada, e falar de função tem cada vez menos sentido. Isso pode ser filosoficamente desapontador, mas não há saída para isso. (ibid, p.192)

Se Cummins estiver correto em sua apreciação, enunciados atribuidores de função se mostrarão apropriados em diferentes graus. De fato, sua conclusão, pelo menos à primeira vista, parece convincente, porque quando olhamos para os objetos naturais ou artificiais, vemos neles graus variados de funcionalidade, tanto dentro do mesmo sistema,

quanto entre sistemas distintos. Em outros termos, a estratégia analítica se mostra apropriada em diferentes graus, quando comparamos (i) diversos níveis hierárquicos de um mesmo sistema e (ii) diversos tipos de sistemas distintos no mundo.

Por sua vez, a perspectiva desenvolvida por Wright não faz quaisquer distinções quanto aos graus em que enunciados funcionais se mostram apropriados, exatamente porque não se dirige aos aspectos do mundo natural enfocados pela teoria de Cummins. Para Wright, há um corte claro entre o que é funcional e o que não é, de modo que se algo não é função, então é um acidente. Por exemplo, se utilizamos um dicionário para suportar o monitor de um computador, com o objetivo de ajustar sua altura, esta não é a função do dicionário, da perspectiva de Wright, mas apenas um acidente. Para Wright, suportar um monitor não é a função do dicionário, não é a razão pela qual ele existe ou está presente naquele lugar, mesmo que este seu uso especial nos satisfaça naquele momento. A abordagem de Cummins, contudo, permite dizer sem problemas que ajustar a altura do monitor é a função do dicionário neste caso, já que a capacidade do dicionário de ajuste da altura contribui para uma capacidade do todo, a saber, o uso eficiente do computador pelo sistema usuário-computador-dicionário.

Assim, a partir da observação das diferenças entre estes dois autores, podemos nos perguntar: a ausência de distinção clara entre função e não-função por Cummins não seria devida a uma ausência em sua teoria de uma distinção entre função e acidente, como aquela esboçada por Wright? É possível que sim e a seguir, exploramos melhor este ponto.

Como argumentaremos na seção seguinte, a ausência de uma distinção entre função e acidente, no âmbito da teoria de Cummins sobre funções, não é necessariamente uma falha desta, como pretenderam mostrar alguns autores, mas trata-se, antes, de uma característica desta abordagem. Entretanto, isso não significa que Cummins esteja imune a críticas. O que pretendemos mostrar é que as críticas quanto a este ponto não se aplicam à sua análise funcional, mas, sim, ao seu ataque à neo-teleologia. De fato, ao atacar a neo-teleologia, Cummins pode ser contra-atacado por ‘jogar o bebê fora junto com a água do banho’. Como também argumentaremos a seguir, sua crítica à neo-teleologia não reconhece os ganhos intelectuais que esta posição nos proporcionou no que diz respeito ao entendimento das explicações funcionais, dentre os quais, a importância da distinção função/acidente nas explicações evolutivas.

6. Críticas dirigidas a Cummins

Nesta seção, pretendemos apresentar algumas objeções à abordagem da análise funcional de Cummins (*cf.* Millikan, [1989]1998; Kitcher, [1993]1998; Wouters, 1999, 2003), bem como às idéias expostas por este filósofo em seu artigo no qual lança sua crítica à neo-teleologia. Pretendemos também mostrar, do nosso ponto de vista, onde as críticas dirigidas contra Cummins se aplicam e onde não se aplicam.

6.1. Objeção do excesso de liberalidade

A objeção padrão à análise funcional de Cummins é a de que este referencial é excessivamente liberal (conhecida na literatura como “*too liberal objection*”). Por suas características, a teoria de Cummins nos permitiria – dizem os críticos – tratar como funções efeitos que não são intuitivamente entendidos como funções ou atribuir funções a partes de sistemas que nós não pensamos intuitivamente como partes que tenham funções (Wouters, 2003). Millikan ([1989]1998), por exemplo, aponta como uma suposta conseqüência absurda da aplicação da teoria de Cummins que se possa considerar, da perspectiva desta teoria, que, no ciclo da água, a função das nuvens seja produzir chuva. Kitcher (1993, p. 494) também apresenta outros supostos contra-exemplos:

Sem que se reconheça o papel subjacente das fontes de design, uma explicação como a de Cummins se torna demasiadamente liberal. Qualquer sistema complexo pode ser submetido à análise funcional. Assim, nós podemos identificar a função que um arranjo particular de rochas toma ao contribuir para a ampliação do delta de um rio algumas milhas abaixo, ou as funções de seqüências mutantes de DNA na formação de tumores – mas não há quaisquer funções genuínas aqui, e nenhuma análise funcional. A análise causal da formação do delta não se liga de modo algum com uma fonte de design; a abordagem das causas dos tumores revela *disfunções*, não funções. (Kitcher, [1993]1998, p. 494, *itálico no original*)

Assim, supostamente por contrariar nossas intuições (ou respectivas visões sobre o mundo), a teoria de Cummins estaria equivocada. Num dos exemplos de Kitcher, a aplicação da análise funcional seria ilegítima porque, de acordo com ele, “a formação do delta não está ligada de modo algum a uma fonte de design”. Mas esta exigência de Kitcher é absolutamente supérflua. O que ele pede neste caso é que a análise funcional esteja de acordo com sua própria visão teórica (que se apóia no conceito de design e busca uma unificação entre a análise funcional e as abordagens etiológicas selecionistas). O mesmo ponto vale também para Millikan ([1989]1998). Da mesma forma que Kitcher, esta filósofa, como salienta Griffiths ([1993]1998, p. 435), pensa que “a análise de Cummins não contribui para o entendimento das ‘funções próprias’ (*proper functions*) dos itens biológicos e dos artefatos humanos. Millikan nota que muitas ‘funções de Cummins’ não são ‘funções próprias’.”. Tudo o que as críticas de Kitcher e Millikan nos dizem, em suma, é que a abordagem de Cummins não se mostra adequada às suas respectivas teorias sobre as funções. Não são, portanto, realmente objeções à teoria de Cummins, mas, sim, demonstrações da diferença nítida entre suas abordagens e a de Cummins. Além disso, o que Kitcher conclui ser uma consequência absurda da análise funcional de Cummins, i.e. seu suposto excesso de liberalidade, não é mais do que uma característica inerente a ela.

Além disso, podemos indagar se os supostos contra-exemplos de fato evidenciam uma ausência de legitimidade da análise funcional de Cummins. Como apontamos acima, Cummins não pretende que haja uma distinção do tipo tudo-ou-nada quanto à funcionalidade (ver Cummins, [1975]1998, p. 192, cuja citação está reproduzida acima, na seção 5), que é, para ele, antes uma questão de grau. Assim, podemos nos perguntar se não seria exatamente esta suposta ‘falha’ da teoria de Cummins que permite que a estratégia analítica seja amplamente utilizada em diversas ciências, como fisiologia, psicologia e ecologia? Não seria esta sua característica que a permite ser aplicada tão bem a fenômenos tão diversos, estudados por variadas ciências? Suspeitamos que sim, e se estivermos corretos, Kitcher não nos apresenta propriamente uma *reductio ad absurdum* da teoria de Cummins quando diz que “qualquer sistema complexo pode ser submetido à análise funcional”. A análise de Cummins pretende explicar exatamente isto, o comportamento de sistemas complexos, quaisquer que sejam.

Pelo exposto, temos a suspeita de que Cummins não tem sido bem interpretado neste ponto. Os críticos dizem que sua abordagem é muito liberal. Mas eles cometem um engano ao tomar a liberalidade como um defeito, como bem aponta Caponi (2002, p. 66-67). Kitcher, por exemplo, confunde duas abordagens ao dizer, conforme a citação acima, que “não há funções genuínas aqui”. De fato, não há funções genuínas, *se tomarmos função no sentido etiológico selecionista*. A nossa impressão é que o problema com a crítica destes autores à abordagem de Cummins está no fato de que eles apresentam exemplos nos quais pretendem aplicar a análise funcional, mas *compreendem* ‘função’ num sentido diferente daquele de Cummins, muitas vezes no sentido etiológico selecionista. Ou seja, mesmo no contexto de uma aplicação da análise funcional de Cummins, eles manteriam a concepção de função como aquilo que explica por que algo existe. Como vimos acima, *explicar por que algo existe não é o uso que Cummins pretende fazer da noção de função*.

O erro em questão corresponde a confundir duas abordagens sobre função, duas visões de mundo diferentes e que devem ser mantidas em separado, como argumentamos no início deste artigo (ver seção 2; ver também Godfrey-Smith, 1993). Se quisermos avaliar a análise funcional de Cummins, temos de compreendê-la em seus próprios termos, dentro do escopo e do limite estabelecidos por este filósofo (ver seção 5). Em particular, consideramos que a liberalidade da análise funcional não deve ser vista como um defeito, mas sim como uma característica inerente a ela mesma.

Como um ponto adicional, devemos perceber que os ‘contra-exemplos’ oferecidos são de fenômenos ecológicos, relacionados ao ciclo da água, à formação de nuvens, à estrutura de rios, ou mesmo casos nos quais tradicionalmente os itens em questão não surgiram devido à seleção natural. Ao mesmo tempo, se tivermos em vista que Kitcher combina as visões de Wright e Cummins, poderemos notar também que as abordagens etiológicas selecionistas se aplicam de modo mais apropriado aos exemplos de biologia evolutiva. Nestes casos, o que se busca explicar tradicionalmente são características de organismos individuais, os quais estão sujeitos à ação da seleção natural. Mas não é tacitamente aceito que a seleção natural opere ao nível de sistemas ecológicos⁶⁰. Sendo assim, o exemplo das rochas e do delta do rio, levantado por Kitcher não é um caso a que

⁶⁰ Essa visão tem sido desafiada, por exemplo, pela idéia de construção de nicho, mas uma discussão deste assunto foge ao escopo do presente artigo (Para maiores detalhes, ver Odling-Smee et al, 2003).

normalmente recorram biólogos evolutivos e filósofos interessados nas explicações funcionais (ainda que seja possível e até interessante)⁶¹. Em conseqüência, por mais esta razão, a crítica de Kitcher não é assim tão significativa.

6.2. Suposição de que a evolução é um processo unicamente gradual

A partir dos argumentos que expostos em Neo-teleology, podemos inferir que Cummins apóia sua rejeição da neo-teleologia como um todo na assunção, algo implícita, de que apenas mudanças graduais ocorrem no processo evolutivo. Na medida em que não deixa espaço para posições alternativas ao gradualismo estrito, como o saltacionismo, Cummins vê como equivocadas quaisquer posições que demandem o surgimento de novidades funcionais. Cummins, em sua crítica à neo-teleologia fraca, nos parece equivocado, ao subestimar a importância de eventos que geram novidades funcionais, como revela a seguinte citação:

A neo-teleologia fraca torna-se verdadeira apenas por causa dos raros, embora importantes, casos, nos quais o alvo da seleção é também o portador de uma função que dá conta da seleção daquele traço. Estes serão casos nos quais uma novidade funcional genuína é introduzida; um traço presente em uma subpopulação que não é apenas melhor na execução de alguma função que é também executada em subpopulações competidoras (embora não tão bem), mas um traço que executa uma função que não é executada por nenhum mecanismo correlato em subpopulações competidoras. Isto inquestionavelmente acontece, e a importância de tais eventos seminais [*seeding events*] não deve ser subestimada. Mas estruturas complexas como asas de pardal e corações humanos não foram introduzidos deste modo. (Cummins, 2002, p. 165)

⁶¹ Isto não significa, é preciso ressaltar, que na ecologia estejam ausentes atribuições e explicações funcionais. Muito pelo contrário, é comum ver atribuições e explicações funcionais na ecologia (ver por exemplo, Ricklefs, 2003, p. 6), ainda que tais usos de função pelos ecólogos não estejam explicitamente ancorados em qualquer referencial epistemológico sobre o tema. Contudo, apesar de não desenvolvermos nossos argumentos aqui neste sentido, pensamos que a análise funcional de Cummins oferece uma base sólida aos usos de função nesta ciência.

É interessante notar que o próprio Cummins subestima os eventos (ao não os considerar em seus exemplos) que, de acordo com ele não devem ter sua importância subestimada. Este filósofo considera apenas exemplos que apóiam seu argumento (olhos e asas) e desconsidera aqueles que poderiam refutá-lo.

Um outro problema associado a este no argumento de Cummins é que apesar de reconhecer que são eventos importantes, ele considera raros os casos em que é válida a identidade entre o alvo da seleção e o alvo da atribuição funcional. Caso a identidade valha em algumas instâncias, se nos apoiarmos na definição do próprio Cummins, então a neo-teleologia fraca terá um domínio de aplicação legítimo, já que ela só precisa valer em *alguns* casos. Para sustentar um argumento forte a favor da rejeição da neo-teleologia fraca, Cummins precisa ter critérios não-arbitrários para identificar o termo “raros” com o termo “alguns”. Não nos parece suficiente a defesa de Cummins de que eventos que geram novidades funcionais sejam de fato raros. Esta nos parece uma questão sobre a qual ainda não dispomos de dados empíricos e de teorização suficiente na biologia evolutiva para construir argumentos tão fortes quanto os de Cummins. Se estes eventos não forem tão raros quanto Cummins supõe que o sejam, então, eles nos darão um espaço legítimo para aplicar a abordagem neo-teleológica, em sua versão fraca.

Cummins afirma que seus argumentos “não são meramente uma defesa do gradualismo.” (Cummins, 2002, p. 166). Porém em seguida, propõe:

Sem dúvida há casos nos quais uma subpopulação adquire alguma estrutura ou comportamento que o restante da população não possui, um análogo biológico de adicionar um regulador a uma máquina a vapor, ou um escape a relógios. Mas tais casos devem ser muito raros. [...] Se eles exaurem o domínio apropriado da neo-teleologia, então a neo-teleologia é insignificante na melhor das hipóteses. Ela vem a ser verdadeira como um tipo de acidente, uma coincidência no tipo raro de caso no qual a vantagem seletiva coincide com a introdução de algo com uma função nova (naquele contexto). (Cummins, 2002, p. 166)

Além disso, em nota, Cummins afirma que uma

[m]utação, por exemplo, é muito mais provável de mudar o tamanho, a densidade ou o ângulo de inserção de um osso, do que adicionar um novo osso. O osso alterado terá tipicamente a mesma função que seu competidor. (ibid. id.)

A partir destes argumentos, Cummins, então, infere que a *neo-teleologia como um todo* – ou seja, todas as abordagens etiológicas seletivas – estão equivocadas. Esta crítica só faz sentido, contudo, se o gradualismo for, de fato, a *única* posição aceitável em biologia evolutiva. Mas pode-se argumentar de modo consistente que ele não o é, conforme fazem Gould & Eldredge (1977).

Cummins não reconhece adequadamente o papel de mudanças evolutivas que ocorrem a taxas mais rápidas, às vezes denominadas ‘saltos evolutivos’. Vejamos a seguir como a concepção que reconhece a existência de saltos evolutivos pode garantir *alguma legitimidade* à neo-teleologia fraca, e em consequência também à neo-teleologia como um todo.

Antes de apresentar nosso argumento central contra Cummins, é necessário tratar, ainda que brevemente, do que podemos e do que não podemos explicar apelando à neo-teleologia fraca. Esta versão da neo-teleologia não pode apelar à função para explicar por que um traço surgiu, na medida em que, como corretamente apontou Cummins, traços não surgem por causa de suas funções, mas por conta de suas histórias desenvolvimentais (Cummins, 2002, p. 162; para uma citação literal de Cummins, ver seção 4 deste artigo). Isso porque a atividade exercida pelo item biológico que pode contar como sua função deve ser uma atividade que o item executa *ex post facto*, ou seja, após o desenvolvimento ter ocorrido. Desse modo, a função não pode explicar em caso algum a origem de um traço biológico, que a precede.

Entretanto, *contra* Cummins, podemos apelar à função de uma neo-teleológica para explicar o aumento da frequência do traço na população. Isso ocorre porque o exercício da função do traço, neste caso, precede ou é simultâneo ao aumento de sua frequência na população. O apelo à seleção natural como um processo de base não é, então, espúrio, contra Cummins (pois seu argumento tem como foco a explicação do porquê de um traço existir e de aumentar sua frequência na população). Em outros termos, a seleção natural oferece um mecanismo consistente para explicar por que traços funcionais se tornam mais

comuns na população, mas não para explicar a origem de traços funcionais. Vejamos através de um exemplo como a neo-teleologia fraca preserva sua legitimidade como uma abordagem para explicar o aumento da frequência dos traços na população.

O nosso exemplo está ligado à evolução de espinhos (isto é, projeções externas do esqueleto) nos peixes esgana-gata (*Gasterosteus aculeatus*), comuns em lagos da região setentrional da América do Norte. Atualmente, há duas formas de esgana-gata em tais lagos, que descendem de um ancestral comum muito recente (Carroll, 2005, p. 175). Uma forma possui espinhos longos e vive no corpo d'água, em águas profundas, enquanto a outra possui espinhos curtos e habita o fundo lodoso dos lagos (ver Figura 1).

As duas formas diferem principalmente nas placas ósseas que revestem as laterais do corpo, apresentando espinhos que se projetam para o exterior nas regiões dorsal e ventral. Uma explicação adaptacionista da evolução dos espinhos dos esgana-gata pode ser formulada de modo consistente. Na forma com espinhos longos, estas estruturas, especialmente os espinhos pélvicos, passaram a funcionar como uma proteção contra predadores, na medida em que aumentam o diâmetro do peixe, tornando mais difícil que sejam engolidos por outros peixes. Logo, os espinhos longos garantiam, no corpo d'água, aos peixes que os possuíam uma vantagem frente à pressão de predação. Porém, tais espinhos se tornavam desvantajosos no fundo dos lagos, na medida em que a posse de tais espinhos facilita a predação dos peixes por larvas de libélulas. Os organismos que, porventura, se arriscassem no fundo lodoso dos lagos seriam facilmente capturados, o que teria mantido esta forma dos esgana-gata longe do fundo lodoso. Entretanto, a outra forma de esgana-gata não enfrenta a pressão de predação que afeta a forma com espinhos longos. Os peixes com espinhos curtos são mais capazes de escapar à predação pelas larvas de libélulas.

Note-se, primeiro, como se dá a relação entre micro-hábitat e seleção numa explicação adaptacionista desta característica dos esgana-gata. Suponham a situação plausível de que a competição entre os esgana-gata no corpo d'água, por exemplo, por alimento, se torna cada vez mais intensa. Nestas circunstâncias, variantes que consigam explorar outro micro-hábitat, como o fundo lodoso dos lagos, podem levar vantagem, pelo acesso a mais fontes de alimentos. Estas variantes poderiam, então, ter sido aquelas com espinhos mais curtos, que, na medida em que tivessem maior sucesso reprodutivo do que

variantes com espinhos longos, deixariam mais descendentes que herdariam a característica de ter espinhos curtos. Geração após geração, formas com espinhos cada vez mais curtos teriam sido favorecidas, pela sua capacidade de obter alimento no fundo dos lagos. Portanto, nesta explicação adaptacionista, a evolução da forma com espinhos curtos teria sido inteiramente gradual, com os espinhos encurtando de geração a geração. A exploração dos fundos lodosos teria sido, assim, anterior ao processo de seleção cumulativa que teria resultado na redução dos espinhos.

Como os críticos do adaptacionismo (e.g., Gould e Lewontin, [1978]1994) destacam, uma explicação adaptacionista, como a formulada acima, constitui um cenário plausível que não pode ser sustentado somente com base em sua plausibilidade. É necessário testar empiricamente este cenário. Haveria alguma explicação alternativa para a estrutura das placas ósseas dos esgana-gata de espinhos curtos? Carrol (2005, p. 176) aponta que os espinhos pélvicos fazem parte do membro posterior destes peixes e sua redução numa das formas de esgana-gata é o resultado de uma modificação do esqueleto durante o desenvolvimento embrionário. Como explica este autor, esta modificação está relacionada a um gene regulatório do desenvolvimento chamado *Pitxl*, que atua na formação da nadadeira pélvica dos peixes. A análise deste gene em esgana-gata com deficiências de espinhos mostrou que sua expressão está ausente exatamente nos brotos das nadadeiras pélvicas, devido a mutações que atingiram a região regulatória que atua sobre sua expressão somente nesta estrutura do embrião. Assim, a inibição da expressão do gene nos brotos das nadadeiras pélvicas é responsável pela origem da diferença morfológica entre as duas formas de esgana-gata que estamos considerando.

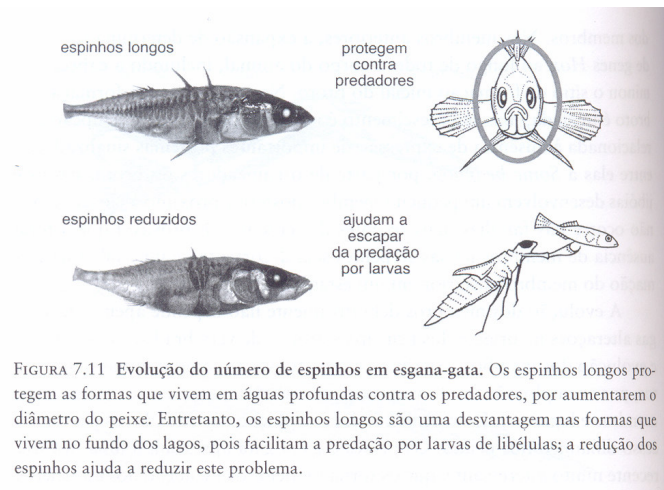


FIGURA 7.11 Evolução do número de espinhos em esgana-gata. Os espinhos longos protegem as formas que vivem em águas profundas contra os predadores, por aumentarem o diâmetro do peixe. Entretanto, os espinhos longos são uma desvantagem nas formas que vivem no fundo dos lagos, pois facilitam a predação por larvas de libélulas; a redução dos espinhos ajuda a reduzir este problema.

Figura 1. Evolução dos espinhos em esgana-gata (*Gasterosteus aculeatus*). Retirado de Carrol (2005, p. 176)

Os indivíduos com espinhos reduzidos surgiram de um ancestral que apresentava espinhos longos. Na medida em que envolveu a desativação de uma única seqüência regulatória do desenvolvimento, a origem da forma com espinhos curtos não pode ser explicada como um processo gradual que levou da forma com espinhos longos à forma com espinhos cada vez menores, tal como a explicação adaptacionista propõe. A mudança ocorreu num único passo, tendo resultado de uma alteração no processo de desenvolvimento destes peixes. Não se trata de fato de uma idéia surpreendente: num organismo multicelular, o desenvolvimento é responsável pela origem de toda a forma orgânica e de toda e qualquer variação na forma orgânica. Neste exemplo dos esgana-gata, podemos ver que o desenvolvimento pode resultar em mudanças nas características dos organismos que não são graduais, mas discretas. Este é um fenômeno que pode ser nomeado tal como sugerido por William Bateson, que cunhou em 1894 o termo ‘homeose’ para designar a origem de um órgão a partir de outro por uma transformação discreta e completa (Bateson, 1894).

Nesta explicação das modificações das placas ósseas dos esgana-gata baseada na regulação do desenvolvimento, apoiado pelas evidências empíricas disponíveis, temos um cenário muito diferente daquele que encontramos na explicação adaptacionista, que, não obstante sua plausibilidade, se mostra empiricamente menos consistente. Não somente a mudança da característica não é gradual, como a relação entre micro-hábitats e os processos

seletivos envolvidos é de outra natureza. Neste caso, o mais plausível é que, primeiro, tenham surgido, por homeose, variantes com espinhos reduzidos, que, somente depois, foram capazes de explorar o micro-hábitat do fundo dos lagos de modo a aumentar seu sucesso reprodutivo.

Podemos ver, ainda, que no caso de tais alterações homeóticas, podemos construir um argumento a favor de algum valor explicativo para a neo-teleologia fraca, ainda que para dar conta de apenas parte do *explanandum* que é tipicamente assumido pelos neo-teleologistas (apenas o aumento da frequência do traço na população). É claro que, no caso dos esgana-gata, não podemos apelar à função dos espinhos curtos para explicar sua origem, dado que, como notou Cummins (e já reiteramos algumas vezes neste artigo), as estruturas não existem por causa de suas funções, mas sim por causa de suas histórias de desenvolvimento. Entretanto, podemos apelar para a função de modo legítimo para explicar por que os esgana-gata cujas placas ósseas têm espinhos curtos puderam se estabelecer nos fundos lodosos e, assim, aumentaram seus números geração após geração (considerando-se, claro, alguns elementos de genética de populações, relativos à estrutura de cruzamento das populações de esgana-gata, que não temos como abordar no âmbito deste artigo). Na medida em que as placas ósseas com espinhos curtos funcionam de modo eficaz como proteção contra predação no fundo dos lagos, estes organismos tinham uma vantagem que seus parentes de espinhos longos não possuíam naquele micro-hábitat. Assim, podemos apelar à função das placas ósseas com espinhos curtos para explicar por que os organismos que as possuíam se tornaram mais comuns. Como vimos anteriormente, a neo-teleologia forte sustenta a tese de que todos os traços surgiram ou aumentaram sua frequência por causa de suas funções. Na medida em que identifica equivocadamente o alvo da atribuição funcional ao alvo da seleção, a neo-teleologia forte deve ser completamente rejeitada, como propôs Cummins. Por sua vez, a neo-teleologia fraca resiste às críticas de Cummins, ainda que não inteiramente. Ela não pode ser usada para explicar a origem dos traços, porém podemos lançar mão desta versão da neo-teleologia, contra Cummins, para explicar um fenômeno muito relevante, o aumento da frequência dos traços numa população, ou em

termos mais amplos, as mudanças na constituição genotípica e fenotípica das populações biológicas⁶².

6.3. Ausência de distinção entre função e acidente

Também neste caso, temos mais propriamente uma característica da abordagem de Cummins do que uma objeção a ela. É interessante notar que, ao considerarmos da perspectiva da análise funcional os casos de ‘disfunções’ (*cf.* crítica de Kitcher [1993]1998, apresentada acima), percebemos (como já apontamos antes) que ela não oferece uma distinção entre função e acidente. Em nosso entendimento, trata-se de uma limitação desta abordagem, conforme ressaltamos acima, e não de uma falha. Suspeitamos que uma abordagem sistêmica, tal como a que Cummins formulou, que não leva em consideração o caráter histórico dos sistemas sob estudo, não pode realmente trazer em si tal distinção.

A referida distinção parece, antes, caber muito bem no seio de uma formulação histórica, tal como a proposta por Wright e outros neo-teleologistas. Quando consideramos os sistemas biológicos como sistemas que devem sua existência a uma longa história prévia, estamos considerando sua construção (em termos de suas estruturas morfológicas, plano do corpo, comportamentos complexos, ou quaisquer outros itens). Conseqüentemente, desejamos explicar por que as partes sob consideração existem e, entre os eventos que determinaram causalmente a construção do sistema, estão o que os proponentes de abordagens etiológicas chamam de função e de acidente. Note-se, ainda, que acidentes podem adquirir, ao longo das gerações, um caráter funcional, se forem efeitos fortuitos benéficos para os possuidores do traço que realizou o acidente (*i.e.*, se contribuirão suficientemente para a sobrevivência e reprodução dos envolvidos e se o traço em questão for herdável). Isso se torna claro na distinção entre dois tipos diferentes de traços funcionais (aptações) por Gould e Vrba (1982), as adaptações e as exaptações.

Assim, embora seja importante no contexto de uma abordagem evolutiva dos fenômenos biológicos, a distinção entre função e acidente é dispensável no âmbito da

⁶² Na medida em que a neo-teleologia não pode explicar a origem dos traços de modo algum, e apenas pode explicar, em alguns casos, o aumento da frequência dos traços na população, então podemos colocar em dúvida a relevância da neo-teleologia para as explicações em biologia evolutiva. No entanto, aqui, estamos apenas apontando para esta questão, que precisa ser melhor investigada. No presente artigo, não seguiremos, contudo, com esta linha de argumentação.

análise funcional de Cummins. Para este filósofo, função é uma capacidade qualquer de um ítem à qual apelamos para explicar a capacidade do sistema que o contém. Logo, acidentes do ponto de vista etiológico selecionista podem qualificar-se como funções para Cummins.

7. Considerações finais

Neste artigo, tratamos de duas abordagens centrais sobre funções na filosofia da biologia: a abordagem etiológica selecionista de Wright ([1973]1998) e a análise funcional de Cummins ([1975]1998). Como pretendemos ter mostrado, estas abordagens se dirigem a aspectos diferentes do mundo vivo: a abordagem etiológica selecionista enfatiza o caráter histórico dos sistemas biológicos, enquanto a abordagem analítica de Cummins foca sobre a complexidade e as relações entre propriedades das partes e do todo, em um sistema complexo.

Parece-nos importante manter as abordagens etiológicas de função e a análise funcional devidamente separadas, em vez de tentar integrá-las numa abordagem sintética, que pretensamente dê conta de todo e qualquer caso do uso de função nas ciências biológicas. Esta é a tese do consenso dualista defendido por Godfrey-Smith (1993), que pode apoiar-se com proveito, em nosso entendimento, sobre a distinção entre biologia evolutiva e biologia funcional esboçada por Mayr (1988) e Jacob ([1970]1983). Além disso, muitos dos argumentos desenvolvidos ao longo deste artigo também reforçam a necessidade de aceitar-se um pluralismo no que concerne às teorias sobre função. Por exemplo, algumas críticas levantadas por Kitcher e Millikan contra Cummins nos parecem ser devidas à falta de atenção quanto a este ponto, como discutido acima.

Quando reconhecemos a legitimidade do pluralismo, podemos inclusive abordar com mais clareza as críticas dirigidas seja contra a neo-teleologia, seja contra a análise funcional de Cummins. Assim, estaremos em melhor posição para perceber quais destas críticas se aplicam e quais são de fato inadequadas.

A crítica de Cummins à neo-teleologia traz à tona certas fragilidades das abordagens etiológicas selecionistas. Uma fragilidade subjacente às abordagens etiológicas selecionistas é seu viés estritamente selecionista. Quando reconhecemos outros fatores, como restrições físicas e desenvolvimentais, que também desempenham papel importante

na evolução biológica, podemos perceber uma falha importante da neo-teleologia. Neste ponto, Cummins localiza muito bem sua crítica à neo-teleologia, quando diz que não a critica por ser ela uma análise conceitual defeituosa, mas por oferecer uma explicação evolutiva ruim (*cf.* Cummins, 2002, p. 165). Na medida em que a seleção natural não é o único processo produtor de novidades evolutivas, não se pode pretender que ela tenha lugar exclusivo em todas as explicações evolutivas. Tal exigência do neo-teleologista consiste em inflacionar a seleção natural, atribuindo a ela poderes causais que não lhe cabem. A seleção natural é tomada, então, como a única força impulsionadora da evolução, perdendo-se de vista outros fatores que podem desempenhar papéis importantes na evolução lado a lado com a seleção natural, como as restrições desenvolvimentais (Maynard-Smith et al, 1985) ou a construção de nicho (Odling-Smee et al, 2003).

Em nossa visão – e aqui nos apoiamos também na crítica ao adaptacionismo (ver Gould & Lewontin, [1978]1994) –, as explicações em biologia evolutiva devem de fato buscar a etiologia do fenômeno que se busca explicar, porém, não devem recorrer exclusivamente, em todos os casos, à seleção natural, visto que nem sempre este mecanismo é o principal responsável pelo fato de algum item estar presente num certo organismo. Na medida em que ele não é o único fator que deve desempenhar algum papel na explicação dos processos evolutivos, nossas conclusões apontam para a importância da construção de uma agenda mais ampla nas investigações filosóficas sobre as explicações em biologia evolutiva. Trata-se de investir esforços em abordagens etiológicas plurais, que incorporem em suas explicações não apenas a seleção natural, mas também restrições físicas, restrições e contingências desenvolvimentais, o processo da construção de nicho, ou até mesmo o papel das restrições impostas pelo sistema Terra a um de seus subsistemas, os organismos vivos (Volk, 1998).

O que há de comum nas explicações que recorrem a estes diferentes fatores é o caráter narrativo da explicação. Assim, propomos que é mais apropriado exprimir o significado da explicação em biologia evolutiva em termos de seu *caráter narrativo*⁶³, e não em termos das abordagens etiológicas selecionistas, as quais são, afinal, estritamente

⁶³ Para um exemplo, ver a narrativa que apresentamos na seção 6.2, para a evolução dos espinhos no peixe esgana-gata (*Gasterosteus aculeatus*).

seleccionistas. Neste sentido apoiamos a posição pluralista defendida por Gould e Lewontin ([1978]1994, p. 73), em sua conhecida crítica ao adaptacionismo.

Por sua vez, em alguns pontos, a crítica de Cummins à neo-teleologia nos parece excessiva e não se justifica adequadamente. Enquanto sua crítica se dirige corretamente à neo-teleologia forte, ela não se mostra tão adequada quando dirigida à neo-teleologia fraca. Dito de outra maneira, ele nos oferece argumentos de fato convincentes contra a neo-teleologia forte, mas sua rejeição da neo-teleologia fraca é um procedimento muito mais retórico do que propriamente lógico. Para rejeitar a neo-teleologia fraca, ele se apóia na premissa falsa de que o processo evolutivo é caracterizado apenas por mudanças graduais.

Assim, como consequência de nossa análise, pensamos que a crítica de Cummins é importante para traçar limites à aplicação da abordagem neo-teleológica, ao evidenciar falhas presentes nela. Porém, tal crítica não é suficiente para levar-nos a abandonar completamente tal abordagem, como deseja o próprio Cummins. Acreditamos que há um uso legítimo do conceito de função nas abordagens etiológicas selecionistas, assim como há um uso legítimo do conceito de função no âmbito da análise funcional. A aceitação desta tese é tão mais facilitada quanto mais compreendemos a importância e legitimidade do consenso dualista de Godfrey-Smith (1993), o qual pode ser apoiado, como mostramos, pela distinção entre biologia funcional e evolutiva proposta por Mayr e Jacob.

Esta defesa do consenso dualista pode ser vista também como uma defesa da importância de aspectos pragmáticos da explicação em biologia. Neste sentido, a observação do contexto nos quais as explicações são solicitadas e oferecidas é de grande relevância. Este ponto foi bem colocado por Margarita Ponce:

A relação entre fins e entidades funcionais deve fundar-se em necessidades de conhecimento e de inteligibilidade: assim, ‘fim’ e ‘entidade funcional’ designarão não uma propriedade ontológica dos fenômenos, mas sim o papel que (suas descrições) *desempenham em virtude de sua posição dentro de um argumento explicativo* [...]. (Ponce, 1987, pp. 232-3, ênfase no original)

Desta perspectiva, o que compreendemos como função não independe de nossas concepções de mundo. De um modo geral, são antes, os nossos interesses e concepções

sobre os fenômenos naturais que orientam a nossa própria definição destes. Assim, as concepções de função de Wright e Cummins, aqui discutidas, ocorrem dentro de argumentos próprios que lhes conferem um contexto de aplicação legítimo.

Acabamos por alcançar duas respostas possíveis para a questão colocada por Ferreira (2003), uma preserva a teleologia na biologia, a outra não. A perspectiva etiológica seletcionista preserva o pensamento teleológico, ao passo que a abordagem da análise funcional desenvolvida por Cummins se mantém, de acordo com ele mesmo, distante de compromissos teleológicos. As abordagens de Wright (uma instância da perspectiva etiológica) e Cummins, aqui analisadas, divergem, pois, quanto ao estatuto da teleologia nas ciências biológicas. Porém, elas convergem no sentido de que depositam grande poder explanatório sobre as atribuições funcionais, ou, em termos mais amplos, sobre a função, ainda que conceituem o termo de maneira profundamente diferente. Portanto, a partir das críticas de ambos os lados do debate, a compreensão sobre função na biologia é sobremaneira enriquecida. As críticas apontam para a necessidade de delimitar o escopo e o limite de cada uma destas abordagens.

À guisa de conclusão, e muito mais com a intenção de provocar novas discussões, temos a impressão de que seria interessante investir esforços sobre os usos que o conceito de função pode ter nas diversas ciências, biológicas ou não. Os conceitos de função propostos por Wright e Cummins transcendem a biologia, perpassando outras ciências, especialmente aquelas interessadas em explicações narrativas, históricas, de um lado, e as ciências que lidam com fenômenos complexos, de uma perspectiva analítica, de outro. Este nos parece um interessante tema para investigações futuras.

Agradecimentos

N.F.N.N. agradece ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida durante a realização deste trabalho e à FAPESB, pelo financiamento de projeto de pesquisa. C.N.E.H. agradece ao CNPq por bolsas de produtividade em pesquisa e à FAPESB e ao CNPQ, por financiamentos de projetos de pesquisa.

Referências

Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, 1998.

Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, 2002.

Bateson, W. *Materials for the Study of Variation*. New York: Macmillan, 1894.

Beckner, M. Function and Teleology. *Journal of the History of Biology*, vol. 2, pp. 151-164, 1969.

Bigelow, J. & Pargetter, R.; Functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 241-259, [1987]1998.

Canfield, J.. Teleological Explanations in Biology. *The British Journal for the Philosophy of Science*, vol. 14, n. 56, pp. 285-295, 1964.

Caponi, G. Biología Funcional vs. Biología Evolutiva. *Episteme*, n. 12, p. 23-46, 2001.

Caponi, G. Explicación seleccional e explicación funcional: la teleología en la biología contemporânea. *Episteme*. Nº 14, pp. 57-88, 2002.

Caponi, G. Física del organismo vs hermenêutica del viviente: el alcance del programa reduccionista en la biología contemporânea. *História, Ciência, Saúde – Manguinhos*. Vol. 14, nº 2, pp. 443-468, abr-jun, 2007.

Carnap, R.; Morris, C.; Neurath, O. (eds.). *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. 1, Chicago: University of Chicago Press, 1955.

Carrol, S. *Infinitas formas de grande beleza*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2005.

Chediak, K. Análise do conceito de função a partir da interpretação histórica. In: Prestes, M.E.; Martins, L.A.C.P.; Stefano, W. (eds). *Filosofia e História da Biologia 1. Seleção de Trabalhos do IV Encontro de Filosofia e História da Biologia*. São Paulo: Fundo Mackenzie de Pesquisa, pp. 161-174, 2006.

Cummins, R. Functional Analysis. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology* . Cambridge-MA: MIT Press, pp. 169-196, [1975]1998.

Cummins, R. *The Nature of the Psychological Explanation*. Cambridge-MA: MIT Press, 1983.

Cummins, R. Neo-teleology. In: Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, pp. 157-172, 2002. Disponível em

<https://netfiles.uiuc.edu/rcummins/www/HomePage/Cummins.html>>. Acesso em: 16 mar. 2006.

Darwin, C. *A Origem das Espécies*. Belo Horizonte: Itatiaia, 4ª edição, [1859]2002.

Dennett, D.C. *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. New York-NY: Simon & Schuster, 1995.

Ferreira, M.A. A teleologia na biologia contemporânea. *Scientia Studia*, vol. 1, n. 2. pp. 183-193, 2003.

Feyerabend, P. *Contra o Método*. Rio de Janeiro: Francisco Alves Editora, pp. 347-445, [1975]1977.

Godfrey-Smith, P. Functions: Consensus without unity. *Pacific Philosophical Quarterly*, vol. 74, pp. 196-208, 1993.

Godfrey-Smith, P. A Modern History Theory of Functions, In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 453-477, [1994]1998.

Gould, S.J. & Lewontin, R.C.. The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. In: Sober, E. *Conceptual Issues in Evolutionary Biology*, pp. 73-90 [1978]1994.

Gould, S.J. & Vrba, E. Exaptation: a missing term in the science of form. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 519-540, [1982]1998.

Gould, S.J. & Eldredge, N.. Punctuated Equilibria: The Tempo and Mode of Evolution Reconsidered. *Paleobiology*, vol. 3, n. 2, pp. 115-151, 1977.

Griffiths, P. Functional analysis and proper functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 435-452, [1993]1998.

Hempel, C. & Oppenheim, P. Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science*, vol. 15, n° 2, pp. 135-175, april, 1948.

Hull, D. Teleologia, in: *Filosofia da Ciência Biológica*. Rio de Janeiro: Zahar, 1975.

Hull, D. Recent Philosophy of Biology: A review. *Acta Biotheoretica*, vol. 50, n° 2, pp. 117-128, jun, 2002.

Jablonka, E. Information: Its Interpretation, Its inheritance, and Its sharing. *Philosophy of Science*, vol. 69, pp. 578-605. 2002.

Jacob, F.. *A Lógica da Vida: uma história da hereditariedade*. Trad. Ângela Loureiro de Souza. Rio de Janeiro: Graal, [1970]1983.

Johansson, I. The Constituent Function Analysis of Functions. In: Koskinen, H.J., Pihlström, S. & Vilkkö, R. (eds.). *Science - A Challenge to Philosophy?*, Peter Lang, Frankfurt, pp. 35-45, 2006.

Kitcher, P. Function and Design in: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 479-503, [1993]1998.

Maynard-Smith, J.; Burian, R.; Kauffman, S.; Alberch, P.; Campbell, J.; Goodwin, B.; Lande, R.; Raup, D.; Wolpert, L. Developmental Constraints and Evolution. *The Quarterly Review of Biology*, vol. 60, nº 3, pp. 265-287, September, 1985.

Mayr, E.. *Toward a New Philosophy of Biology: Observations of an Evolutionist*. Cambridge-MA: Harvard University Press, 1988.

Mayr, E. *Biologia, Ciência Única*. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.

Millikan, R. In Defense of Proper Functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 293-312, [1989]1998.

Mitchell, S.. *Biological Complexity and Integrative Pluralism*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

Neander, K. Function as Selected Effects: The Conceptual Analyst's Defense. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 313-333, [1991]1998.

Odling-Smee, F.J., Laland, K.N., Feldman, M.W. *Niche Construction: The Neglected Process in Evolution*. Princeton: Princeton University Press, 2003.

Ostrom, J.H.. Archaeopteryx and the origin of flight. *Quarterly Review of Biology*, vol. 29, pp. 27-47, 1974.

Ostrom, J.H.. Bird Flight: How did it begin? *American Scientist*, vol. 67, pp. 46-56, 1979.

Ponce, M. *La explicación teleológica*. Coyoacán, México: Universidad Autónoma de México, 1987.

Prum, R.O. & Brush, A.H. A controvérsia do que veio primeiro, penas ou pássaros? *Scientific American Brasil*, vol. 11, pp. 64-73, 2003.

Ricklefs, R.E. *A Economia da Natureza*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.

Rosenberg, A. & McShea, D. *Philosophy of Biology – a contemporary introduction*. New York: Routledge, 2008.

Salmon, W.C. *Four Decades of Scientific Explanation*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1990.

Sepulveda, C.; El-Hani, C.N. Adaptacionismo versus exaptacionismo: o que este debate tem a dizer ao ensino de evolução? *Ciência & Ambiente*, no prelo.

Sorabji, R. Function. *Philosophical Quarterly*, vol. 14, n. 57, pp. 289-302, 1964.

Tipler, P. *Física: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica*, vol. 1. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A, 2000.

Volk, T. *Gaia's Body: toward a physiology of the earth*. New York: Copernicus. 1998.

Williams, G.C. *Adaptation and Natural Selection*. Princeton-NJ: Princeton University Press, [1966]1996.

Wimsatt, W. Functional Organization, Analogy, and Inference. In: Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, pp. 173-221, 2002.

Wouters, A. *Explanation without a cause*. Dissertation Thesis. Leiden Utrecht Research Institute of Philosophy, 1999.

Wouters, A. Philosophers on Function. Essay Review of A. Ariew, Cummins, R. And Perlman, M. (eds) *Functions: New Essays in the Philosophy of Psychology and Biology*. *Acta Biotheoretica*, vol. 51, n° 3, pp. 223-235, 2003.

Wouters, A. The Function Debate in Philosophy. *Acta Biotheoretica*, vol. 53, pp. 123-151, 2005.

Wright, L. Functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 51-78, [1973]1998.

CAPÍTULO 3

Análise funcional do sistema CLAW⁶⁴

Resumo: Neste artigo, propomos bases teórico-metodológicas para a atribuição de funções no programa de pesquisa Gaia, a partir da abordagem funcional de Robert Cummins. De acordo com a análise funcional de Cummins, as capacidades globais de sistemas complexos devem ser explicadas com base em capacidades dos componentes do sistema, sendo as funções entendidas, então, como capacidades dos componentes do sistema às quais apelamos para explicar a presença de uma determinada capacidade sistêmica. Como condição importante para realizar a análise funcional em Gaia, é preciso tratar de questões como decomposição de um sistema em partes componentes, da localização das funções nestas partes e da integração entre os componentes do sistema. Abordamos estes temas epistemológicos a partir do quadro teórico geral oferecido por William Bechtel e Robert Richardson. Consideramos as sugestões de decomposição do sistema Gaia apresentadas por Tyler Volk. Realizamos, então, uma análise funcional do sistema proposto pela hipótese CLAW (Charlson et al, 1987), que integra algas oceânicas, o sulfeto de dimetila (DMS), um subproduto do metabolismo das algas, a produção de nuvens e o clima global. Propomos decompor o sistema CLAW em dois níveis: (i) num primeiro nível, em reservatórios (oceano, atmosfera e seres vivos), os quais, (ii) num segundo nível foram decompostos em partes componentes (algas, compostos de enxofre, radiação solar, nuvens, etc). As capacidades destes componentes do sistema proposto por CLAW são tratadas como as funções destas no sistema como um todo e explicam, juntamente com a organização do sistema, a realização da capacidade sistêmica em questão, a saber, a produção de nuvens sobre os oceanos. A partir deste estudo de caso, concluímos que a análise funcional de Cummins fornece um quadro teórico consistente para a construção de explicações funcionais e para a atribuição de funções no contexto de Gaia, também podendo contribuir, assim, para a superação do problema das explicações teleológicas no programa de pesquisa. Além disso, esperamos com este artigo suscitar discussões sobre os usos de ‘função’ em Gaia, assim como novas aplicações do referencial de Cummins a outros sistemas ou mecanismos propostos por este programa de pesquisa ou, em termos mais gerais, pela Ciência do Sistema Terra.

Palavras-chave: Gaia, Análise Funcional, Cummins, hipótese CLAW.

Abstract: In this paper, we address the theoretical-methodological bases for functional ascriptions in the Gaia research programme, from the point of view of Robert Cummins’ functional approach. According to Cummins’ functional analysis, the global capacities of complex systems should be explained by the capacities of components of the system. Then, functions are taken as the components’ capacities to which we appeal in order to explain the manifestation of a selected capacity of the system as a whole. As an important condition to apply the functional analysis to Gaia, one should consider decomposition, localization

⁶⁴ Uma versão deste artigo em língua inglesa será submetida ao periódico *Journal of Theoretical Biology*

and integration in complex systems. We address these epistemological issues from the perspective of the general theoretical framework offered by William Bechtel and Robert Richardson. After a discussion of this framework, we consider Tyler Volk's suggested decompositions of the Gaia system. We build, then, a functional analysis of the mechanism proposed by the CLAW hypothesis, which integrates oceanic algae, dimethyl sulphide (DMS), a by-product of algal metabolism, the production of clouds, and the global climate. We decompose the CLAW system in two levels: (i) at the first one, in primary pools (ocean, atmosphere and living beings), which, (ii) at a second level were decomposed in component parts (algae, sulphur compounds, solar radiation, clouds, etc). The capacities of these components of the system proposed by CLAW are treated as their functions in the system as whole and they explain, together with the organization of the system, the realization of the systemic capacity at stake, namely cloud production over the oceans. Based on this case study, we conclude that Cummins' functional analysis offers a consistent theoretical framework for the construction of functional explanations and the ascription of functions in the context of Gaia, and, thus, can so contribute to overcome the problem of teleological explanations in this research program. Moreover, we hope to stimulate discussions on the uses of 'function' in Gaia, as well as new applications of Cummins' framework to other mechanisms proposed by this research program or, generally speaking, Earth System Science.

Keywords: Gaia, Functional Analysis, Cummins, CLAW hypothesis.

1. Introdução

O programa de pesquisa Gaia⁶⁵ foi proposto inicialmente pelo químico inglês James Lovelock, a partir de estudos realizados por ele para a NASA, em parceria com a filósofa Dian Hitchcock, durante a década de 1960. Estes estudos tinham o objetivo de oferecer meios para a detecção de vida em outros planetas (Lovelock & Hitchcock, 1967; Hitchcock & Lovelock, 1967).

O programa de pesquisa foi consideravelmente desenvolvido a partir da cooperação de Lovelock com a microbióloga norte-americana Lynn Margulis. Em conjunto, eles publicaram artigos nos periódicos *Tellus* (Lovelock & Margulis, 1974a), *Icarus* (Margulis & Lovelock, 1974) e *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* (Lovelock & Margulis, 1974b), nos quais apresentaram o programa de pesquisa de modo mais detalhado e bem desenvolvido, em comparação com trabalhos anteriores de Lovelock. Nestes artigos, os

⁶⁵ Neste trabalho, tratamos Gaia como um programa de pesquisa científico progressivo, com base em trabalho prévio do nosso grupo de pesquisa (Lima-Tavares, 2003), onde foi desenvolvida uma análise histórico-epistemológica de Gaia, nos termos da filosofia da ciência de Lakatos ([1970]1995). Doravante nos referiremos a 'programa de pesquisa Gaia', 'programa de pesquisa' ou apenas a 'Gaia', a fim de evitar repetições.

autores propunham que os seres vivos têm a capacidade de alterar seu ambiente físico-químico de modo a mantê-lo em condições adequadas para si mesmos.

De acordo com Gaia, os organismos e o ambiente físico-químico estão ligados através de alças de retroalimentação negativas e positivas. Em virtude de sua enorme quantidade nos sistemas da Terra, estas alças de retroalimentação constituem, para Lovelock e Margulis, uma rede extremamente complexa, que, em última instância, resulta na regulação de variáveis ambientais ao nível global, incluindo a temperatura, a cobertura de nuvens, a composição química da atmosfera, a salinidade e o pH dos oceanos, entre outras. Esta regulação é vista como uma propriedade emergente do sistema Gaia (Lovelock, 1990; Lenton, 2004), sendo que os níveis em que elas são mantidas estão dentro de uma faixa de habitabilidade para os organismos.

Neste trabalho, adotaremos, ao menos provisoriamente, a definição de Lenton & van Oijen (2002) para o sistema material descrito pelo programa de pesquisa⁶⁶. Estes autores definem Gaia como:

um sistema termodinamicamente aberto na superfície da Terra, compreendendo a vida (a biota), a atmosfera, a hidrosfera (oceano, geleiras e água doce), matéria orgânica morta, os solos, sedimentos e aquela parte da litosfera (crosta) que interage com os processos de superfície (incluindo rochas sedimentares e rochas sujeitas a intemperismo). (Lenton & van Oijen, 2002, p. 684).

Nestes termos, Gaia é entendida como um subsistema da Terra, na medida em que não inclui as camadas mais interiores do planeta e surge apenas quando a vida se torna abundante. Este último aspecto decorre do fato de que, somente após se dispersarem pelo planeta, as populações podem afetar significativamente variáveis físico-químicas globais, como, por exemplo, a composição atmosférica (ver Lenton & van Oijen, 2002, p. 684). O fato de o sistema Gaia estar contido no sistema Terra, pode ser apontado, inclusive, como uma razão para sustentar que o programa de pesquisa Gaia e a Ciência do Sistema Terra são duas empreitadas intelectuais distintas, ainda que esta última tenha se beneficiado de idéias

⁶⁶ Mais à frente, ficará claro para o leitor que os argumentos apresentados neste artigo tem implicações para a própria definição do sistema Gaia.

proporcionadas pela primeira (para maiores detalhes sobre este ponto, ver capítulo 1 desta dissertação).

Inicialmente, no final da década de 1960 e início dos anos 1970, as idéias de Lovelock acerca de Gaia foram recebidas com entusiasmo por grupos ambientalistas e espiritualistas, ao passo em que foi negligenciado pela comunidade científica (Tickell, 2004). Entretanto, à medida em que surgiram modelos como o Mundo das Margaridas (Watson & Lovelock, 1983) e o proposto pela hipótese CLAW (Charlson et al, 1987), respectivamente em 1983 e 1987, a resistência da comunidade científica a Gaia reduziu-se significativamente (Schneider et al., 2004). Ainda que suscite controvérsias até os dias de hoje, podemos dizer que o programa Gaia é atualmente uma parte importante do conhecimento científico bem estabelecido sobre a Terra, assim como ilumina de modo heurísticamente rico novos estudos sobre as relações entre a biota e o ambiente físico-químico (Kump et al., 1999; Wilkinson, 2003, 2006).

Com este artigo, pretendemos dar conta de uma questão importante para o programa Gaia, qual seja, o uso de atribuições e explicações funcionais em seu contexto. Como veremos em maiores detalhes na próxima seção, esta questão precisa ser abordada com a devida consistência e profundidade, sobretudo se pretendemos que o programa Gaia continue a desenvolver-se com sucesso.

O presente artigo está estruturado como segue. Nosso primeiro passo, na segunda seção, será uma apresentação breve do problema que pretendemos enfrentar. A terceira seção consiste numa apresentação e discussão da abordagem das funções em sistemas complexos proposta pelo filósofo Robert Cummins. Na quarta seção, nos voltamos à discussão de algumas questões epistemológicas acerca da construção de mecanismos de sistemas complexos, as quais serão importantes para a proposta da nossa abordagem das atribuições e explicações funcionais em Gaia. Nesta seção abordaremos questões relativas à decomposição de um sistema em partes componentes, à localização das funções nestas partes e à integração entre os componentes do sistema. Ainda nesta seção, discutimos as idéias de Tyler Volk sobre modos de decompor o sistema Gaia. Em seguida, na quinta seção, a partir das discussões anteriores, aplicaremos a análise funcional de Cummins ao sistema proposto pela hipótese CLAW, que é parte do programa Gaia e deu origem a um ativo campo de investigações, conhecido como Conexão algas-nuvens. O resultado da

aplicação da análise funcional de Cummins ao sistema proposto pela hipótese CLAW será o nosso *modelo funcional do sistema CLAW*. Pretendemos que a nossa proposta suscite discussões sobre os usos de ‘função’ em Gaia, assim como novas aplicações do referencial de Cummins a outros sistemas ou mecanismos propostos por este programa de pesquisa ou, em termos mais gerais, pela Ciência do Sistema Terra. Na sexta seção, consideramos possíveis limitações do nosso modelo, assim como caminhos possíveis para o desenvolvimento do trabalho de modelagem funcional em Gaia, na linha epistemológica sugerida neste artigo, o que nos leva, então, na seção seguinte, a algumas considerações finais.

2. Teleologia e função em Gaia

Lovelock tem lançado mão, inúmeras vezes de uma linguagem teleológica para explicar as capacidades do sistema Gaia, como podemos notar, por exemplo, na seguinte afirmação: “...a atmosfera da Terra é mais do que meramente anômala; ela parece ser um dispositivo constituído especificamente para um conjunto de propósitos” (Lovelock & Margulis, 1974, p. 3)⁶⁷. Entretanto, em diversos outros momentos de sua obra, Lovelock rejeita compromissos com uma linguagem teleológica no contexto de seu programa de pesquisa, como exemplifica a seguinte citação, na qual ele se refere a ele próprio e a Margulis: “Em nenhuma parte de nossos escritos, nós expressamos a idéia de que a auto-regulação planetária tem um propósito, ou envolve previsão ou planejamento pela biota” (Lovelock, 1990, p. 100)⁶⁸. Basta cotejar estas duas citações para verificar que há uma tensão entre a linguagem empregada por Lovelock e suas afirmações explícitas sobre a ausência de categorias teleológicas em seus argumentos.

A raiz da rejeição à teleologia por Lovelock reside em sua assunção de uma premissa que julgamos equivocada, qual seja, a identificação da ‘categoria explicação teleológica’ com a categoria ‘explicação intencional’. Com base na assunção desta premissa, Lovelock supõe, por exemplo, que o modelo do Mundo das Margaridas (*Daisyworld*), elaborado por ele e Watson (Watson & Lovelock, 1983), responde inequivocamente às

⁶⁷ “...Earth’s atmosphere is more than merely anomalous; it appears to be a contrivance specifically constituted for a set of purposes.”

⁶⁸ “Nowhere in our writings do we express the idea that planetary self-regulation is purposeful, or involves foresight or planning by the biota.”

críticas de que sua teoria seria teleológica. Após referir-se às críticas de W. Ford Doolittle e Richard Dawkins, de que Gaia é teleológica, ele afirma:

No Mundo das Margaridas, mostrou-se que uma propriedade do ambiente global, a temperatura, era regulada com eficiência, ao longo de um amplo espectro de luminosidade solar, por uma biota planetária imaginária, sem a necessidade de previsão ou planejamento. Esta é uma refutação inequívoca da acusação de que a hipótese Gaia seja teleológica e, até o momento, permanece sem ter sido desafiada. (Lovelock [1988]1995, p. 37)⁶⁹

Note-se que Lovelock conclui que Gaia não é teleológica a partir de sua demonstração no modelo desenvolvido por ele e Watson de que não é necessária nenhuma explicação intencional do fenômeno da regulação da temperatura planetária, recorrendo a previsão ou planejamento por parte da biota, o que é uma inferência ilegítima. De fato, o modelo de Watson & Lovelock pode mostrar que o programa de pesquisa não apela a explicações intencionais. Mas ele não pode mostrar, como quer Lovelock, que o programa de pesquisa pode prescindir de *qualquer* explicação teleológica.

Neste trabalho, nosso foco não serão as explicações teleológicas em Gaia, mas sim as atribuições e explicações funcionais. De fato, este é um movimento interessante se notarmos que explicações e atribuições funcionais são usadas com frequência por Lovelock e outros pesquisadores no contexto de Gaia. Tomemos como exemplo a seguinte citação de Lovelock:

‘Qual a função de cada gás no ar?’ Fora do contexto de Gaia, essa pergunta seria considerada redundante e ilógica, mas dentro deste contexto não será mais ilógica do que a pergunta: ‘Qual é a função da hemoglobina ou da insulina no sangue?’ Temos postulado um sistema cibernético; portanto, é razoável indagar a função das partes componentes (Lovelock, [1990]2000, p. 84).

⁶⁹“In Daisyworld, one property of the global environment, temperature, was shown to be regulated effectively, over a wide range of solar luminosity, by an imaginary planetary biota without invoking foresight or planning. This is a definitive rebuttal of the accusation that the Gaia hypothesis is teleological, and so far it remains unchallenged.”

A analogia com o uso das explicações funcionais na biologia funcional (ver capítulo 2) ou na ecologia (Almeida, 2004) é evidente. Entretanto, apesar do apelo recorrente à noção de função para explicar o comportamento do sistema Gaia, em geral os autores que o fazem não oferecem qualquer justificação adequada para o uso do termo ‘função’, nem situam tais usos particulares em um quadro teórico consistente. É preciso, pois, avaliar em que referenciais epistemológicos sobre função é possível apoiar os usos de explicações e atribuições funcionais no contexto de Gaia. Tal análise epistemológica se mostra de grande relevância e a partir dela pretendemos oferecer contribuições para a formulação de explicações funcionais consistentes, e em consequência, a construção de modelos heurísticamente poderosos dos sistemas propostos pelo programa Gaia ou pela Ciência do Sistema Terra⁷⁰.

Nas últimas décadas, no debate sobre a teleologia na filosofia das ciências biológicas, o conceito de função tem desempenhado um papel cada vez mais central. O foco dirigido à função foi, ao menos em parte, um reflexo do sucesso de duas abordagens ainda hoje influentes sobre as atribuições e explicações funcionais na biologia, a teoria etiológica selecionista de Larry Wright ([1973]1998⁷¹) e a análise funcional de Robert Cummins ([1975]1998). A opinião corrente entre os filósofos da biologia, que adotamos aqui, é a de que a primeira é uma abordagem teleológica, ao passo que a segunda está livre de compromissos com a teleologia (ver, por exemplo, Chediak, 2006, p. 161)⁷². Na medida

⁷⁰ Em trabalhos anteriores (Nunes Neto, 2005; Nunes Neto & El-Hani, 2006; Nunes Neto & El-Hani, 2008) tratamos em maiores detalhes da questão da linguagem teleológica em geral no programa Gaia e da tentativa de Lovelock de negar o caráter teleológico de seu programa de pesquisa. Nestes trabalhos, avaliamos as possibilidades de considerar os usos de uma linguagem teleológica ou funcional em Gaia da perspectiva de três referenciais da filosofia da biologia: (i) a teleonomia de Mayr (1988, 2005), (ii) a abordagem etiológica selecionista de Wright e (iii) a análise funcional de Cummins. Aqui, nos apoiamos nas conclusões obtidas nestes trabalhos. Embora não possamos, por razões de espaço, reconstruir toda a argumentação desenvolvida naqueles trabalhos, reproduzimos mais à frente nosso argumento acerca da aplicação da abordagem de Wright e de Cummins a Gaia. Não reproduzimos aqui os argumentos sobre a aplicabilidade da abordagem teleonômica de Mayr a Gaia, por conta de que estamos primordialmente interessados em perspectivas focadas sobre o conceito de função. Porém, podemos dizer que a abordagem de Mayr apresenta problemas similares aos que surgem na aplicação da abordagem de Wright a Gaia (dificuldades sobretudo associadas à grande dependência de processos históricos de seleção, nestes referenciais, como necessários para a atribuição de função). Para maiores detalhes sobre as questões aqui apontadas, indicamos a consulta de nossos trabalhos supracitados.

⁷¹ Na padronização das referências utilizadas neste trabalho, o ano que está entre colchetes é o ano da primeira publicação e o ano que aparece em seguida é a data da edição utilizada, caso esta tenha sido reimpressa sem modificações. Nos casos das edições mais recentes que sofreram revisão ou expansão, indicamos apenas o ano dessa nova edição.

⁷² Para maiores detalhes sobre explicações e atribuições funcionais ver Allen et al, (1998) e capítulo 2 desta dissertação.

em que realizaremos uma aplicação da análise funcional de Cummins a Gaia, é importante perceber que estamos construindo uma abordagem não-teleológica das funções no programa de pesquisa⁷³.

Precisamos, contudo, ainda que brevemente, apresentar nossas razões para a escolha da perspectiva de Cummins sobre funções, ao invés de outros referenciais bastante influentes, como, por exemplo, o de Larry Wright ([1973]1998). Da perspectiva etiológica de Wright, para explicar por que algo tem uma função, é necessário recorrer à etiologia da consequência de ter esse algo no passado. Em termos formais, dizer que a função de x é z significa que “(a) x está ali porque ele faz z e (b) z é uma consequência (ou resultado) de x estar ali” (Wright, [1973]1998, p. 71). Por exemplo, a posse de corações (x) nos vertebrados atuais é parcialmente explicada, nesses termos, pelas consequências (z) da presença dessa estrutura nos ancestrais desses animais. Tais consequências estariam relacionadas ao bombeamento de sangue, sendo a função da estrutura entendida como um efeito selecionado ao longo da história evolutiva do grupo. É importante perceber o caráter estritamente selecionista da abordagem de Wright. Para este autor, a função de um ítem é aquela consequência da posse do ítem que responde porque ele foi selecionado no passado e porque ele se mantém nas linhagens atuais de organismos.

Deste ponto de vista, para explicar processos funcionais no contexto de Gaia, seria necessário fazer referência a uma etiologia, que, por sua vez, deveria fazer referência a um processo de seleção, consciente ou não. Assim, os problemas associados à postulação de um processo de seleção ao nível do sistema Gaia como um todo dificultam a aplicação da perspectiva de Wright ao programa Gaia. De fato, enfrentaremos sérias dificuldades se tentarmos postular um processo de seleção natural ao nível de sistemas de grande escala como Gaia.

A dificuldade de postular um processo de seleção agindo sobre Gaia foi apontada por W. Ford Doolittle, sendo conhecida como o problema da ‘população de um’. Obviamente, em uma população unitária, como é o caso de Gaia, não há variação a ser selecionada e, portanto, não pode haver seleção natural. Deste modo, a análise de Wright,

⁷³ Isto não significa, obviamente, que não seja possível construir uma abordagem *teleológica legítima* das funções em Gaia, mas apenas que da perspectiva de Cummins, que assumimos neste trabalho, não há compromissos com a teleologia.

que está fortemente ancorada nas noções de seleção artificial e natural, não faz sentido se aplicada a Gaia.

Além disso, o que é explicado pela formulação de função de Wright é a presença de determinado estado de coisas, especificamente, a posse de determinado comportamento ou estrutura por um sistema. Conseqüentemente, a perspectiva de Wright, se aplicada a Gaia, explicaria por que o sistema tem certas partes. Ela responderia quais as conseqüências das partes que se mostrariam potencialmente capazes de explicar por que elas estão ali, isto é, suas funções. Mas o que pretendemos explicar no âmbito do programa Gaia não é por que o sistema possui certas partes, mas sim como as atividades dos componentes do sistema contribuem para a execução das capacidades sistêmicas, isto é, os processos de auto-regulação ou auto-organização ao nível do sistema como um todo. Desse modo, a perspectiva etiológica selecionista não responde às questões colocadas no âmbito do programa Gaia. Parece-nos, em suma, que a abordagem de Gaia de uma perspectiva etiológica enfrenta dificuldades que a privam de legitimidade e poder heurístico frente aos problemas sobre os quais nos debruçamos⁷⁴.

Por sua vez, a análise funcional de Cummins evita os problemas que surgem nas tentativas de aplicar a abordagem etiológica selecionista a Gaia. Contudo, razões adicionais para aplicar o referencial de Cummins a Gaia serão apresentados ao longo deste trabalho. Na próxima seção, nos voltaremos para a perspectiva deste filósofo sobre as funções.

3. Análise funcional

A análise funcional foi apresentada por Cummins ([1975]1998, 1983) pela primeira vez no artigo “Functional Analysis”, publicado no *Journal of Philosophy* em 1975, tendo se tornado um dos modelos reconhecidos como padrão para a abordagem das explicações e atribuições funcionais na filosofia da biologia contemporânea. Em contraste com as abordagens etiológicas das funções, de tal perspectiva, atribuições funcionais podem ser realizadas na biologia independentemente de considerações evolutivas. Para Cummins, “uma capacidade complexa de um organismo [...] pode ser explicada mediante apelo a uma análise funcional, independentemente de como ela se relaciona à capacidade do organismo

⁷⁴ Para maiores detalhes sobre as abordagens etiológicas selecionistas de função, ver Allen et al. (1998) e Ariew et al. (2002).

de manter a espécie” (Cummins, [1975]1998, p. 182). Em outro artigo, mais recente, Cummins reforça este mesmo ponto ao afirmar que a “análise funcional é anterior a, e independente de, avaliações de adaptatividade” (Cummins, 2002, p. 167).

Para Cummins, as abordagens sobre as funções anteriores à sua não foram bem orientadas, devido à insistência em considerar a função como algo que explica a existência ou presença do item organísmico sob consideração. Por exemplo, quando perguntamos por que os vertebrados têm corações, freqüentemente se faz referência na resposta dada às conseqüências da posse de corações pelos ancestrais dos vertebrados. Desta ótica, a função é, pois, aquilo que explica por que determinados itens biológicos existem.

Porém, para Cummins, tal apelo à noção de função “[...] é um ato de desespero nascido do pensamento de que não há qualquer outro uso explicativo para a caracterização funcional na ciência” (Cummins, [1975]1998, p.175). Assim, ele busca abordar o assunto de uma perspectiva diferente das abordagens etiológicas seletivas (como a de Wright [1973]1998). Em sua análise funcional, o foco recai sobre as disposições e capacidades complexas que os tipos de sistemas que explicamos funcionalmente exibem.

Da perspectiva de Cummins ([1975]1998), se algum *item i* funciona como uma bomba em um sistema *s*, ou se a função de *algum i* em um sistema *s* é bombear, então *i* deve ser capaz de bombear em *s*. Deste modo, enunciados atribuidores de função implicam enunciados de disposição; ou seja, atribuir uma função a algo é, ao menos em parte, atribuir uma disposição a esse algo. Por exemplo, se a função do vacúolo contrátil em protozoários de água doce é eliminar excesso de água do organismo, então deve haver circunstâncias sob as quais o vacúolo contrátil realmente manifestaria uma disposição para eliminar excesso de água do protozoário em que ele está presente.

Neste sentido, atribuir uma disposição *d* a um objeto *a* é afirmar que o comportamento de *a* está sujeito a certa regularidade legiforme (*law-like regularity*). Dizer que *a* tem *d* é dizer que *a* manifestaria *d* (por exemplo, dissolver-se, dilatar-se, elevar-se etc.) caso ocorressem as condições suficientes para tal. Assim, *a* se comporta de modo a apresentar *d* sempre que colocado sob certas condições⁷⁵. Cummins vincula, então, a uma

⁷⁵ Cummins constrói seu argumento sobre as manifestações das disposições em termos determinísticos. Acreditamos, que é necessário reconstruir seu argumento em termos estatísticos, o que não necessariamente invalida seu próprio argumento. Assim, nos parece mais correto afirmar que “*a* tende a comportar-se de modo

disposição dada, uma regularidade disposicional associada. Esta é, como mencionamos acima, uma regularidade legiforme. As regularidades disposicionais são regularidades observadas no comportamento de um tipo de objeto, em virtude de alguns fatos especiais seu respeito. Por exemplo, nem tudo é solúvel em água. As coisas que o são, porém, se comportam de uma determinada maneira em virtude de uma característica especial típica das coisas solúveis em água. E, para Cummins, o que deve ser explicado é exatamente esta regularidade disposicional. Por sua vez, explicar uma regularidade disposicional é explicar como manifestações da disposição são causadas, dadas as condições precipitantes. Ele descreve duas estratégias para realizar esta explicação: (i) a estratégia da instanciação e (ii) a estratégia analítica.

A aplicação da estratégia de instanciação consiste na subsunção de um caso particular, no qual um objeto manifesta certa disposição, a uma regularidade disposicional legiforme. Por exemplo, podemos explicar desta maneira a disposição de uma barra de ferro de dilatar-se mediante um aumento de temperatura. Neste caso, a explicação se dá através da aplicação de uma regularidade legiforme sobre a dilatação (ou seja, a lei da dilatação linear dos corpos), associada a informações sobre o objeto particular em questão, como seu coeficiente de dilatação linear, a variação de temperatura a que o objeto foi submetido, a variação de seu comprimento etc. (Tipler, 2000, p. 586). Em outras palavras, a regularidade legiforme subsume o caso particular em questão e, juntamente com as condições iniciais particulares, explica a manifestação da disposição no objeto⁷⁶.

A estratégia analítica procede de um modo diferente da estratégia anterior. Em vez de derivar uma regularidade disposicional que especifica d (em a) dos fatos da instanciação de d (em a), no âmbito da estratégia analítica, procedemos a uma análise da disposição d presente em a em uma série de disposições d_1, d_2, \dots, d_n apresentadas por componentes de a , de modo que a manifestação das d_i resultam na, ou levam à, manifestação de d . Cummins pretende que as duas estratégias que propôs se conectem numa abordagem unificada, sendo a condição necessária para isso que, em algum nível da análise das capacidades de um

a apresentar d sempre que...”, de modo a mostrar claramente, que se trata de uma regularidade estatística, ao invés de uma regularidade necessária.

⁷⁶ Não é difícil perceber que esta estratégia se aplica por excelência a campos como a física e a química, devido ao caráter essencialmente nomológico da explicação científica nestes campos. Para mais detalhes sobre o modelo de explicação dedutivo-nomológico, encaminhamos o leitor a Hempel & Oppenheim (1948) e a Salmon (1990).

sistema, as disposições analisadoras ($d_1, d_2 \dots d_n$) que são empregadas sejam passíveis de explicação através de uma estratégia de instanciação. Assim, teríamos uma explicação unificada das capacidades de um sistema complexo, mediante sua análise em capacidades de suas partes até um nível explicativo no qual as disposições que as partes exibem possam ser compreendidas em termos de sua subsunção a uma regularidade disposicional legiforme.

Após a apresentação da estratégia analítica, Cummins propõe uma mudança de terminologia: “Quando a estratégia analítica está colocada, torna-se melhor falar de capacidades (ou habilidades), e não de disposições.” (Cummins, [1975]1998, p. 187). Esta mudança de terminologia tornará a estratégia analítica mais familiar, porque, de acordo com ele, freqüentemente explicamos uma capacidade por meio de sua análise. Esta é a razão pela qual ele passa a falar de capacidades, e não mais de disposições.

Cummins oferece como exemplo uma linha de montagem, que ilustra bem como a estratégia analítica pode capturar um uso adequado do termo ‘função’ em diversas ciências. A produção numa linha de montagem é dividida em várias tarefas distintas. A capacidade global da linha de produzir um determinado produto se deve às capacidades de cada componente da linha de realizar certas tarefas (*id. ibid.*). Se estas tarefas forem realizadas de modo organizado, o resultado será o produto final. Assim, para Cummins, explicamos a capacidade da linha de montagem de produzir o produto apelando às capacidades dos componentes da linha de realizar suas tarefas específicas. Então, a execução, por certo componente, de sua capacidade específica é sua função na linha. Ou seja, a função de um componente da linha, para Cummins, é qualquer que seja a atividade deste componente à qual apelamos para explicar a capacidade da linha como um todo. Esta estratégia analítica é usada corriqueiramente por biólogos e psicólogos em suas investigações (Cummins, [1975]1998, 1983). Porém, é importante ressaltar, ela não se restringe à biologia ou à psicologia apenas, mas pode ser aplicada de um modo geral às ciências que lidam com sistemas complexos.

Para Cummins, o interesse explanatório de uma abordagem analítica é proporcional a (i) o grau em que as capacidades analisadoras são menos sofisticadas do que as capacidades analisadas; (ii) o grau em que as capacidades analisadoras são de tipo diferente das capacidades analisadas; e (iii) a relativa complexidade de organização das partes/processos que são tratadas como componentes do sistema, numa dada abordagem

analítica. Essas considerações nos levam ao seguinte ponto: quanto maior a diferença de sofisticação entre as capacidades analisadoras e as capacidades analisadas, mais sofisticada precisará ser a análise, para que esta lacuna seja preenchida. Nos casos em que essa diferença é pequena, a estratégia da instanciação parece mais adequada e, portanto, nestes casos falar em função parece não ter muito sentido. Como afirma Cummins:

Deve ser admitido, entretanto, que não há qualquer distinção do tipo preto-e-branco aqui, mas um caso de mais-ou-menos. À medida que o papel da organização se torna menos e menos significativo, a estratégia analítica se torna menos e menos apropriada, e falar de função tem cada vez menos sentido. Isso pode ser filosoficamente desapontador, mas não há saída para isso. (ibid, p.192)

Esta característica da teoria de Cummins levou alguns autores a criticá-la por ser excessivamente liberal. Do ponto de vista dos críticos, poderíamos aplicar as explicações funcionais de Cummins a casos nos quais nossa intuição não sugere a existência de funções. Entretanto, os críticos perdem de vista que a liberalidade é muito mais uma característica inerente à própria abordagem do que uma falha dela. Philip Kitcher, por exemplo, afirmou que:

[s]em que se reconheça o papel subjacente das fontes de design, uma explicação como a de Cummins se torna muito liberal. Qualquer sistema complexo pode ser submetido à análise funcional. Assim, nós podemos identificar a função que um arranjo particular de rochas toma ao contribuir para a ampliação do delta de um rio algumas milhas abaixo [...], mas não há quaisquer funções genuínas aqui, e nenhuma análise funcional. A análise causal da formação do delta não se liga de modo algum com uma fonte de design [...] (Kitcher, [1993]1998, p. 494)

Notemos que o caso de que Kitcher lança mão como contra-exemplo à aplicação da análise funcional é um caso próximo aos fenômenos que nos interessam no contexto de Gaia. Se a crítica de Kitcher for correta, então nossa empreitada aqui poderá ser irrelevante. Mas, em nosso entendimento, Kitcher, assim como outros críticos de Cummins, perde de

vista aspectos importantes da análise funcional. Para consubstanciar esta afirmação, apontamos, pois, três razões. Em primeiro lugar, é preciso notar que a abordagem de Cummins não pretende oferecer uma distinção entre função e acidente – algo que é caro apenas às abordagens etiológicas selecionistas de função (como a de Wright). Kitcher, ao afirmar que não há funções genuínas no arranjo particular de rochas para a ampliação do delta de um rio, se apóia na validade irrestrita desta distinção. Porém, ela não é válida no interior do quadro teórico desenvolvido por Cummins. Em segundo lugar, a análise funcional de Cummins tem como domínio de aplicação quaisquer sistemas complexos que possam ser estudados de uma perspectiva analítica. Logo, não é uma objeção à análise funcional, apontar que ela pode ser aplicada a qualquer sistema complexo. E por último, a exigência de Kitcher de que a análise causal da formação do delta deve ligar-se de algum modo a uma fonte de design é absolutamente supérflua, na medida em que o que ele está exigindo, no fundo, é que a abordagem de Cummins seja adequada à sua própria teoria sobre as funções, na qual o design cumpre um papel importante. Em outros termos, a objeção de Kitcher não se aplica pois o recurso ao design é uma característica particular de sua própria abordagem, e não elemento necessário de qualquer abordagem das funções. De fato, design não é um elemento necessário da abordagem de Cummins⁷⁷.

Ainda que seja inadequada como argumento contrário à abordagem de Cummins, por uma suposta liberalidade, a crítica de Kitcher nos coloca diante de um outro ponto importante, no que tange aos nossos objetivos no presente artigo. De fato, é preciso que o objeto da explicação no programa de pesquisa Gaia seja uma instância do que a análise funcional explica. Esta é uma condição imprescindível para a abordagem de Gaia de uma perspectiva funcional.

Sustentamos que diversos fenômenos ecológicos e também aqueles fenômenos que buscamos explicar lançando mão do programa de pesquisa Gaia são explicáveis a partir da perspectiva analítica de Cummins⁷⁸. Em outras palavras, propomos que o *explanandum* do

⁷⁷ Para maiores detalhes sobre a análise funcional de Cummins, as abordagens etiológicas selecionistas e as críticas levantadas por Kitcher, remetemos o leitor ao capítulo 2 desta dissertação, ou diretamente a alguns dos textos originais (Cummins[1975]1998; Wright [1973]1998; Kitcher, [1993]1998; Godfrey-Smith, 1993).

⁷⁸ Especificamente quanto à ecologia, podemos dizer que a análise funcional de Cummins oferece um quadro teórico consistente no interior do qual podemos abordar as atribuições e explicações funcionais freqüentemente realizadas pelos ecólogos (para um exemplo de atribuições funcionais na ecologia, consultar Ricklefs, 2003, p. 6). Contudo na medida em que a ecologia não é o nosso foco aqui, não perseguiremos neste caminho.

programa de pesquisa Gaia é uma instância do *tipo de coisas* que a análise funcional de Cummins explica. Estas afirmações são defensáveis nos seguintes termos: na medida em que o programa Gaia busca explicar as propriedades singulares de auto-regulação ou auto-organização do sistema Gaia como um todo, a partir das capacidades de seus componentes, organizados de certa maneira, ela pode ser submetida à análise funcional de Cummins. Dentre as capacidades sistêmicas de Gaia, estão as capacidades de manutenção da composição química da atmosfera, a constância do pH das águas oceânicas, a manutenção da temperatura da superfície planetária, a concentração de nuvens, entre outras. O fato de que estas capacidades são tratadas por Lovelock (1990) e outros autores (e.g., Lenton, 2004) como propriedades emergentes do sistema Gaia também sugere que elas são capacidades globais analisáveis em capacidades das partes do sistema.

Além disso, precisamos enfatizar aqui outro ponto. Como já apontamos, função é, para Cummins, uma certa propriedade de uma parte do sistema à qual apelamos para explicar uma certa capacidade sistêmica de nosso interesse. Assim, é irrelevante, desta perspectiva epistemológica, se a capacidade da parte à qual nós atribuímos função seja, de outra perspectiva epistemológica, apenas um acidente, por exemplo, um efeito fortuito da evolução do sistema. Ademais, como a abordagem de Cummins não atribui qualquer papel à história na compreensão das funções, não há razão para a distinção função-acidente, intimamente conectada ao problema histórico da origem dos traços, cumprir um papel relevante nesta abordagem. Na análise funcional de Cummins, é perfeitamente cabível dizer, por exemplo, que a função de um gás, o sulfeto de dimetila (DMS), é contribuir para a produção de nuvens sobre os oceanos, ainda que saibamos que o DMS não é mais que um efeito colateral do metabolismo das algas⁷⁹. Como já deve ter ficado evidente, este aspecto é central na tentativa de aplicar a abordagem de Cummins à compreensão das funções atribuídas a itens no contexto do programa Gaia.

Antes, contudo, de partir para a abordagem das idéias de Bechtel e Richardson, faremos uma breve consideração acerca das relações entre as abordagens de Cummins, de um lado, e de Bechtel e Richardson, de outro, na medida em que elas se sobrepõem em algum grau. Uljana Feest (2003, p. 943) chegou a apontar que a ‘decomposição’ mencionada por Bechtel e Richardson (1993) consiste essencialmente na análise funcional

⁷⁹ Este ponto será tratado em detalhes mais à frente no artigo, na seção 5.

de Cummins ([1975]1998), i.e., é a subdivisão de um tipo particular de comportamento em componentes funcionalmente caracterizados. A observação de Feest pode conduzir, então, à idéia de que o quadro teórico desenvolvido por Cummins é subsumido pelo de Bechtel e Richardson (1993). Entretanto, aqui é importante não deflacionar a abordagem de Cummins sobre a explicação funcional. Este filósofo propôs uma abordagem sobre função e explicação funcional que, de fato, apesar de se sobrepor parcialmente à perspectiva de Bechtel e Richardson sobre explicações mecanísticas, cobre questões de filosofia da ciência que não são abordadas em profundidade pelo quadro teórico destes últimos autores. Ademais, Bechtel e Richardson, de um lado, e Cummins, de outro, estão voltados para diferentes problemas de filosofia e metodologia das ciências. Ao passo que os primeiros desejam compreender o processo de construção de explicações mecanísticas (como uma parte das estratégias dos seres humanos para a solução de problemas), Cummins busca compreender os usos legítimos de função na prática científica.

4. Decomposição, localização e integração em sistemas complexos

Para uma aplicação bem-sucedida da análise funcional precisamos definir com clareza o sistema com o qual estamos lidando, ou seja o sistema cuja capacidade pretendemos explicar analisando-a em capacidades das partes componentes. Definimos ‘sistema’ de um modo geral como uma série de elementos que mantém relações uns com os outros (Von Bertalanffy, 1973, p. 55; Pessoa Jr., 1996, p. 30). Entendemos ‘elementos’, por sua vez, como entidades primitivas, as quais são encontradas a cada instante em um dentre vários estados possíveis. É importante assinalar que elementos estabelecem ‘relações’ quando o estado de um elemento depende do estado de um outro (Queiroz & El-Hani, 2006, p. 96-7). É evidente, pois, que um aspecto importante da definição de um sistema consiste na identificação de suas partes componentes.

Quando nos voltamos para o sistema Gaia, percebemos que identificar as suas partes não é uma tarefa trivial, conforme percebeu Tyler Volk (1998), que, referindo-se a uma palestra do biólogo evolutivo Dan McShea na Universidade de Oxford, em 1996, afirma:

McShea apontou que ao tentar aplicar a sua própria hipótese ou a de qualquer outro às funções de partes dentro de totalidades, a fim de gerar *insights* sobre a estrutura

de Gaia, um problema imediato seria encontrado. Quais são as partes de Gaia, afinal? Seus organismos? Seus ecossistemas? (Volk, 1998, p. 94)

Este ponto, destacado por McShea e Volk, é importante, de modo que dedicaremos bastante esforço a examiná-lo neste artigo. Para que possamos aplicar a análise funcional de Cummins a algum mecanismo proposto pelo programa de pesquisa Gaia, precisamos discutir questões como a decomposição de sistemas complexos em partes componentes e a localização de funções nestas partes. Nossa discussão sobre tais questões se fará a partir de idéias desenvolvidas por Bechtel e Richardson (1993).

De acordo com Bechtel e Richardson (1993, p. 18), “uma parte fundamental do desenvolvimento de uma explicação mecanística é [...] determinar quais são os componentes do sistema e o que eles fazem”. No quadro teórico desenvolvido por estes autores, decomposição e localização são entendidas como estratégias heurísticas que orientam a construção de explicações mecanísticas sobre o comportamento de sistemas complexos. Os autores notam ainda que elas agem inclusive como restrições psicológicas sobre os cientistas, no processo de descoberta e de construção de explicações (Bechtel & Richardson, 1993, p. 234).

A estratégia da decomposição “permite a subdivisão da tarefa explanatória de modo que a tarefa se torna tratável e o sistema, inteligível. A decomposição assume que uma atividade de um sistema inteiro é o produto de uma série de funções subordinadas executadas no sistema” (Bechtel & Richardson, 1993, p. 23). Esta estratégia, é assim, complementada pela da localização, a qual consiste, por sua vez, na “identificação de diferentes atividades propostas na decomposição de uma tarefa com o comportamento ou as capacidades de componentes específicos” (Bechtel & Richardson, 1993, p. 24).

As tarefas de decomposição e localização podem falhar, e falham, como de fato registram diversos casos na história da ciência (Bechtel & Richardson, 1993); entretanto, é claro que a falibilidade não é uma característica exclusiva de tais estratégias, mas, antes, algo comum a toda e qualquer estratégia heurística. Como notam Bechtel e Richardson, referindo-se às estratégias de decomposição e localização, “[...] até mesmo quando falham, elas podem servir como ferramentas probatórias para facilitar a descoberta.” (Bechtel &

Richardson, 1993, p. 243). Os autores notam ainda que uma razão pela qual tais estratégias podem falhar é

[...] que as suposições que elas impõem – que o sistema é decomponível ou quase decomponível – podem ser falsas. Alguns sistemas são decomponíveis, e alguns são próximos a isso; outros são menos ainda, entretanto, assumir que eles *são* decomponíveis é um modo de descobrir que eles não o são. (Bechtel & Richardson, 1993, p. 235, ênfase no original).

É interessante notar que este momento de questionamento consiste num ponto de escolha (*choice-point*) importante, para usar a terminologia de Bechtel e Richardson (1993). Os pontos de escolha são momentos nos quais cientistas tomam decisões que moldam a estratégia explanatória. Isso corresponde, em nosso caso particular, a fazer a escolha entre considerar o sistema decomponível ou considerá-lo não-decomponível. Os passos seguintes na construção do nosso modelo serão determinados em parte por tais escolhas.

Sistemas decomponíveis ou quase-decomponíveis têm suas capacidades explicadas pela capacidade de uma parte ou pelas capacidades das partes do sistema. Isso resulta da baixa integração entre os componentes do sistema. Se os componentes não estão integrados, então a organização do sistema terá pouco a contribuir para a explicação do comportamento global que este exibe. Diferentemente, em sistemas integrados, o papel da integração entre os componentes sobrepuja o papel das capacidades individuais na explicação do comportamento sistêmico.

Este é o primeiro ponto de escolha com o qual nos deparamos na tentativa de modelar funcionalmente Gaia ou o sistema CLAW (o sistema cibernético proposto pela hipótese CLAW). Eles são decomponíveis, quase-decomponíveis ou integrados?

Aqui adotaremos um caminho intermediário entre os extremos da decomponibilidade e da integração completas. Nossa postura consiste em reconhecer que Gaia ou o sistema CLAW são decomponíveis, porém a mera decomposição do sistema não pode dar conta sozinha do comportamento sistêmico. Em outras palavras, meramente decompor o sistema em partes componentes não é suficiente para explicar a instanciação das capacidades sistêmicas. Isto se dá porque a organização do sistema desempenha

também um papel relevante na explicação da capacidade sistêmica que se deseja compreender. O papel relevante da organização aponta para a importância da integração em sistemas como os que estamos lidando. Em suma, pretendemos construir um caminho intermediário entre a decomponibilidade trivial do sistema e a assunção de que por ser um sistema integrado, não pode ser explicado de modo algum por decomposição.

4.1 As propostas de decomposição de Volk

Aqui apresentamos as idéias de Tyler Volk (1998) sobre a decomposição do sistema Gaia. Esperamos que o exame de tais idéias possa preparar o terreno para a aplicação da análise funcional ao sistema CLAW.

Volk (1998, p. 99) trata Gaia como um sistema complexo e avalia diferentes estratégias para a divisão deste sistema em partes componentes. De diferentes pontos de vista, Gaia pode ser considerada quanto à presença de (i) biomas: “grandes biosistemas regionais ou subcontinentais caracterizados por um tipo principal de vegetação ou outro aspecto identificador da paisagem” (Odum, 1988, p. 3), (ii) guildas tróficas: organismos agrupados de acordo com seu lugar nas cadeias tróficas (por exemplo, carnívoros, herbívoros, produtores etc), (iii) guildas bioquímicas: “um agrupamento de organismos que executam funções químicas similares” (Volk, 1998, p. xv), (iv) ciclos: circuitos dos elementos químicos entre os componentes biológicos e geológicos do sistema Terra, (v) substâncias primárias ou reservatórios primários: os oceanos e águas continentais, os solos e rochas, a atmosfera, a vida e (vi) domínios genéticos e reinos eucarióticos: organismos agrupados por similaridades filogenéticas.

Na medida em que há uma grande dificuldade em determinar com clareza qual o melhor modo de dividir o sistema (conforme observado por McShea, citado acima), Volk propõe que “[t]alvez a melhor visão de todas seria conceber os próprios pontos de vista como partes que juntas fazem o todo.” (Volk, 1998, p. 99; ver figura 1).

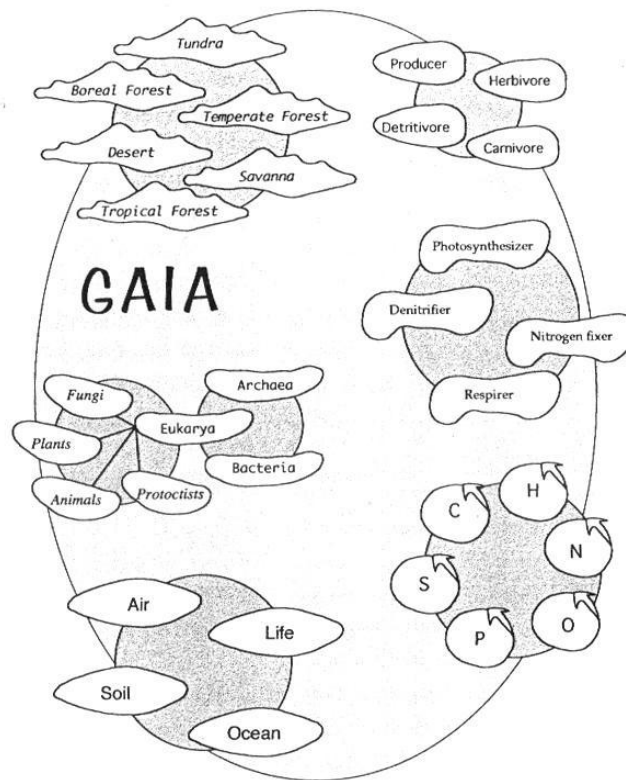


Figura 2. Representação dos seguintes pontos de vista sobre as partes de Gaia, de acordo com Volk: Biomas, guildas tróficas, guildas bioquímicas, ciclos, substâncias primárias, domínios genéticos e reinos eucarióticos. (Retirado de Volk, 1998, p. 99).

Este argumento de Volk constitui, em nosso entendimento, um claro equívoco. Ele considera diferentes *pontos de vista sobre o sistema* e, portanto, está tratando de categorias *metodológicas* ou *epistemológicas*, como se fossem *partes* do sistema, logo, categorias ontológicas. Não obstante as relações íntimas entre ontologia e epistemologia que podem ser sustentadas, confundir categorias ontológicas e epistemológicas não é mais do que uma fonte de importantes confusões. Os diferentes pontos de vista sobre o sistema Gaia não podem ser considerados partes do sistema, porque eles são, antes, *aspectos* diferentes e talvez até parcialmente sobrepostos⁸⁰, do mesmo sistema. Uma divisão do sistema Gaia em partes deve consistir numa *ontologia* do programa de pesquisa Gaia, e não na enunciação de diferentes modos de decompor o sistema descrito por ele. Entretanto, a proposta de Volk (1998) recebe apoio de Schellnhuber & Held (2002, p. 20), que a vêem como um meta-

⁸⁰ De fato, o próprio Volk (1998) percebe que há sobreposição em alguns casos.

método útil para estudar o sistema Terra: “[m]anter a coleção completa de pontos de vista define um meta-método, que devemos preferir na medida em que várias descrições não são reduzidas a uma teoria fundamental.” De fato, apesar do equívoco que apontamos, os diferentes pontos de vista sobre o sistema levantados por Volk (1998) nos oferecem um quadro heurísticamente rico, a partir do qual podemos escolher o melhor critério para dividir o sistema Gaia em partes. O mapeamento de Volk é, pois, um bom ponto de partida. Ele próprio, ao focar sua atenção sobre três pontos de vista, oferece uma sugestão para o passo seguinte. Em suas palavras:

Os ciclos e as guildas bioquímicas são, na minha opinião, dois dos melhores modos de dividir Gaia para induzir a questões provocativas. [...] Mas há uma superposição adicional [...] cujo valor como uma ferramenta mental [*mind tool*] rivaliza com a de qualquer outra. Esta é uma divisão baseada em reservatórios primários [*primary pools*] (Volk, 1998, p. 104).

Assim, Volk (1998) foca sua atenção em três alternativas, que parecem apresentar mais poder heurístico, dentro do universo de decomposições elencadas por ele: guildas bioquímicas, ciclos biogeoquímicos e reservatórios primários. Analisemos cada uma delas.

Os reservatórios primários incluem os solos e as rochas; a atmosfera; os oceanos e a vida. Nesta decomposição, os seres vivos constituem elementos de ligação entre os diferentes reservatórios físico-químicos do planeta, perpassando todos eles. A própria vida tem moldado características de tais componentes físico-químicos do planeta ao longo da evolução biológica (para alguns exemplos, ver capítulo 1). A capacidade dos seres vivos de transformar o ambiente físico-químico evidencia-se, por exemplo, pela criação de imensas superfícies de contato, que amplificam, dentre outros processos, as trocas gasosas entre organismos e o ambiente físico-químico (ver Volk, 1998, p. 120). É importante notar a decomposição do sistema Gaia em reservatórios inclui todas as partes deste, e não apenas agrupamentos de organismos, como faz a decomposição em termos de guildas.

Uma guilda bioquímica é “um agrupamento de organismos que executam funções químicas similares” (Volk, 1998, p. xv). As principais guildas são os fotossintetizadores, os respiradores, os desnitrificadores e os fixadores de nitrogênio. Inicialmente, este ponto de

vista pode parecer totalmente adequado para atribuir funções às partes do sistema, já que a funcionalidade é o próprio critério de definição das guildas. Entretanto, devemos notar que as guildas são agrupamentos de organismos, o que sugere uma ênfase excessiva sobre a vida, enquanto o ambiente físico-químico parece ficar em segundo plano. Desse modo, permanece a suspeita de que esta decomposição não pode dar conta adequadamente da totalidade do sistema Gaia.

A decomposição em ciclos oferece-nos uma perspectiva diferente sobre o sistema Gaia. Em primeiro lugar, por ser uma divisão do sistema em termos de processos, e não de entidades, como as decomposições em guildas e reservatórios. Além disso, a perspectiva dos ciclos integra muito bem os componentes bióticos e abióticos do sistema Gaia. Esta pode ser combinada de modo interessante com a decomposição em guildas bioquímicas. Volk aponta nesta direção, quando sugere que, no ciclo do carbono, teríamos duas guildas bioquímicas, que de algum modo seriam complementares, os respiradores e os fotossintetizadores. Do mesmo modo, o ciclo do nitrogênio incluiria as guildas dos fixadores de nitrogênio (como as bactérias nas raízes das leguminosas), assim como a dos denitrificadores, em ambientes aquáticos com baixo nível de oxigênio (Volk, 1998, p. 103). Esta decomposição ‘híbrida’, de ciclos e guildas bioquímicas, pode apresentar interessantes contribuições para a construção de modelos funcionais do sistema Gaia.

Em suma, as três decomposições do sistema Gaia são válidas e heurísticamente ricas. É importante perceber que cada uma delas pode servir a diferentes tarefas epistêmicas ou diferentes modelos do sistema Gaia ou do sistema Terra. Não faremos aqui uma escolha entre qualquer um destes modos de decompor Gaia. Voltaremos, contudo, a estas três decomposições, elencadas por Volk, na nossa aplicação da análise funcional ao sistema CLAW, na próxima seção.

5. Rumo a um modelo funcional em Gaia

5.1. Sobre algas, nuvens e o clima global

O clima é o resultado de interações complexas de uma miríade de fatores físicos, químicos e biológicos. Muitas das características físicas importantes do nosso planeta estão diretamente ligadas ao clima, sendo que uma em especial, a temperatura, tem recebido

grande atenção, nos últimos anos, sobretudo por conta das preocupações em torno do aquecimento global. Entretanto, outras variáveis geofísicas são também de grande relevância para a compreensão das mudanças climáticas. Uma destas é o albedo planetário, medida geofísica da refletividade média do planeta⁸¹. É importante ressaltar, inclusive, que a temperatura e o albedo são inversamente proporcionais. Logo, evidentemente, um aumento no albedo, implica numa redução da temperatura, ao passo que uma redução no albedo, resulta num aumento da temperatura.

Diversos elementos influem no albedo planetário. Florestas boreais contribuem, por exemplo, para uma diminuição do albedo, dado que tendem a ser mais escuras do que o ambiente circundante, e assim, contribuem para um aquecimento da superfície terrestre (Wilkinson, 2006, pp. 74-75). Já outros componentes do sistema Terra contribuem para um aumento do albedo planetário e, portanto, para um resfriamento da superfície. Dentre estes, estão a cobertura de gelo nos pólos, a neve, os desertos e as nuvens. Reconhecendo que o impacto final no aumento do albedo planetário é resultado das contribuições destes fenômenos, focaremos nossa atenção apenas sobre a produção de nuvens, que será, portanto, nosso fenômeno de interesse no estudo de caso que realizaremos aqui. Neste sentido, nossa atenção estará dirigida para um subsistema de Gaia que está relacionado à regulação do albedo planetário, o que, por sua vez, se vincula à regulação da temperatura média global do planeta.

Dentre os componentes do sistema Terra, as nuvens são apontadas como um dos fatores mais importantes para o aumento do albedo planetário e, em conseqüência, para a redução da temperatura média global (ver Charlson et al., 2001, p. 2025; IPCC, 2007; Kump & Pollard, 2008, p. 195).

Sendo a produção de nuvens o fenômeno no qual estamos interessados, como podemos explicá-lo? Aqui, assumimos que, para explicar como nuvens são produzidas, precisamos enfocar os mecanismos que as produzem. A nossa premissa é que, de modo

⁸¹ O albedo, é uma medida física, representada numericamente como uma fração entre 0 e 1, e indica a taxa de refletividade média de um corpo. Corpos mais escuros tem albedo mais próximo a 0, já que refletem pouca radiação, enquanto corpos mais claros tem albedo mais próximo a 1, pois refletem mais radiação. Assim, em termos geofísicos, planetas mais claros tendem a refletir mais radiação, ao passo que os mais escuros tendem a refletir menos. Salientamos que aqui nos referimos apenas ao albedo das superfícies das nuvens que estão voltadas para o espaço, não às suas superfícies voltadas para a Terra. Isto porque o que nos interessa aqui é o balanço entre absorção e reflexão de energia radiante solar que chega ao planeta, via espaço interplanetário.

compatível com a maneira como a ciência tipicamente busca a compreensão dos fenômenos, podemos oferecer, a partir da elucidação do mecanismo que produz o fenômeno sob consideração, uma explicação mecanística do mesmo (Bechtel & Richardson, 1993).

A produção de nuvens é um fenômeno complexo, determinado por diversos fatores. Nuvens começam a se formar a partir de núcleos de condensação de nuvens (NCN), aos quais se agregam moléculas de vapor d'água em suspensão na atmosfera. Podem funcionar como NCN, partículas de poeira e pólen, fungos, bactérias, fragmentos de folhas, além de compostos resultantes de atividades industriais humanas (Artaxo et al, 2005; Pauliquevis et al, 2007). Entretanto, nosso interesse aqui está dirigido aos NCN biogênicos, como o sulfeto de dimetila (DMS), isoprenos e terpenos.

Pesquisas recentes apontaram que isoprenos e terpenos liberados pela vegetação atuam como NCN na atmosfera sobre a floresta amazônica (ver, por exemplo, Andreae et al., 2004; Artaxo et al, 2005; Pauliquevis et al, 2007). É possível que o mecanismo descrito para a floresta amazônica por Andreae et al (2004) ocorra também em outras áreas continentais do planeta, sobretudo, as que possuem grande cobertura florestal.

O DMS, por sua vez, tem origem em diversas espécies de algas oceânicas. A importância das algas como fontes de NCN e em consequência de nuvens, é apontada, por exemplo, por Ayers & Cainey:

micro- e macro-algas têm um importante papel no sistema climático, porque provêm os gases precursores [...] para a formação de novas partículas e fornecem uma fonte de NCN, sem os quais nós não teríamos quaisquer nuvens. (Ayers & Cainey, 2007, p. 370).

Aqui, restringiremos nossa atenção ao processo biogênico de produção de nuvens por NCN derivados de algas. Ao passo que os terpenos e isoprenos contribuem para a produção de nuvens sobre áreas continentais, o sulfeto de dimetila atua como NCN de nuvens sobre a superfície oceânica. Deste modo, delimitamos ainda mais o nosso fenômeno de interesse: *a produção de nuvens sobre os oceanos*. Um mecanismo que descreve o processo de produção de nuvens sobre os oceanos é aquele descrito pela hipótese CLAW, proposta por Charlson e colaboradores (1987). O nome da hipótese é um acrônimo formado

a partir das iniciais dos nomes dos autores do trabalho em que ela foi apresentada: Charlson, Lovelock, Andreae e Warren.

De modo bastante breve, a hipótese CLAW propõe que há uma alça de retroalimentação negativa ligando as algas, o DMS e as nuvens. Segundo os autores, quanto mais quente, mais salina e mais intensamente iluminada a região do oceano, maior a taxa de volatilização de DMS para a atmosfera. As porções de água nos oceanos que não estão cobertas por nuvens tendem a ser mais iluminadas e se aquecer mais, já que recebem a radiação solar diretamente. O aumento da temperatura deve levar a um aumento da produção de DMS pelas algas⁸², contribuindo, assim, para um aumento na formação de nuvens do tipo estrato sobre os oceanos. Estas nuvens reduzem, então, a temperatura e a luminosidade da superfície, porque refletem boa parte da radiação solar incidente a partir do espaço. A diminuição da temperatura na superfície da água leva, então, a uma menor produção de DMS, o que reduz, por sua vez, a nucleação de nuvens, levando novamente a um aumento da incidência de raios solares sobre a superfície da água. Isto fecha, então, a alça de retroalimentação proposta (Figura 2).

⁸² A rigor, as algas não sintetizam DMS, mas sim o seu precursor, um composto conhecido como dimetilsulfoniopropionato (DMSP). O DMSP é exsudado da célula da alga (uma pequena proporção do total sintetizado pelo metabolismo) ou liberado pelos seguintes processos (a maior parte do DMSP sintetizado): autólise, predação por zôoplâncton ou ataques virais ou bacterianos (cf. Simó, 2001). O ponto importante aqui, para nosso argumento, é que apenas fora da célula da alga, o DMSP é convertido em DMS através de uma demetilação enzimaticamente mediada. A enzima que catalisa a reação é liberada para o meio exterior a partir da lise das células de algas ou está presente no metabolismo do zôoplâncton, que as preda (Simó, 2001). Quando dizemos que as algas liberam DMS estamos realizando uma simplificação do processo, como muitos trabalhos de revisão sobre o assunto, o que é compreensível na medida em que apenas elas sintetizam o precursor do DMS.

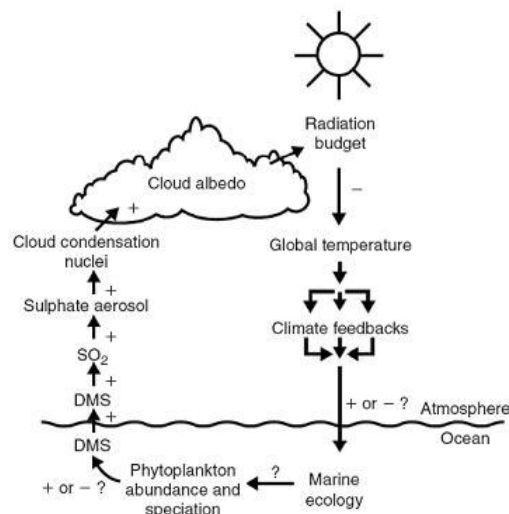


Figura 2. Representação simplificada e esquemática da hipótese CLAW (retirado de Ayers & Cainey, 2007, p. 367). Os sinais de + ou – indicam, respectivamente, retroalimentação positiva ou negativa. As interrogações indicam as relações entre os componentes do sistema que ainda não estão claras no estado atual do conhecimento, como discutido no corpo do texto.

Algumas dúvidas acerca das relações entre as algas, a biota marinha, os compostos de enxofre, as nuvens e o clima em geral ainda permanecem na comunidade científica, tendo já sido apontadas, inclusive, no artigo que originalmente apresentou a hipótese (Charlson et al., 1987). Os resultados empíricos gerados desde a proposição da hipótese CLAW não apontam todos numa mesma direção, a favor ou contra o modo de operação proposto para o sistema. Por exemplo, ainda é uma questão em aberto se o sinal da retroalimentação é positivo ou negativo, isto é, se o sistema é de amplificação ou de controle. Também permanecem dúvidas acerca do modo como a ecologia marinha influencia a abundância e a especiação do fitoplâncton, e também como estas variáveis se vinculam à liberação de DMS (ver Figura 2). Tais lacunas não devem, contudo, surpreender-nos, na medida em que a área de pesquisa na qual se insere a hipótese é muito recente. Além disso, é importante notar que a incerteza é parte natural do processo de produção do conhecimento científico.

Nossa escolha do sistema CLAW como o sistema de interesse se justifica por algumas razões. Não podemos aqui dar conta de todos os processos de auto-regulação postulados pelo programa Gaia. Desse modo pretendemos realizar um estudo de caso sobre como as ferramentas conceituais de modelagem oferecidas pela análise funcional de

Cummins e pela abordagem das explicações mecanísticas de Bechtel & Richardson podem contribuir para a modelagem de sistemas no programa de pesquisa Gaia.

A partir do exposto, temos razões suficientes, em nosso entendimento, para sustentar que o modelo aqui desenvolvido pode ter contribuições substanciais para Gaia, em particular, diante da controvérsia sobre o papel da teleologia no âmbito deste programa, da necessidade de justificação e explicação das atribuições funcionais feitas na mesma, e até mesmo para a compreensão de como a existência de um sistema global de regulação, como Gaia, pode ser compatível com o conhecimento estabelecido em biologia evolutiva (conforme veremos mais à frente).

5.2. CLAW pode ser concebido como um sistema cibernético funcionalmente integrado

Aqui trataremos o sistema CLAW como um “sistema funcionalmente integrado”, i.e., um sistema no qual

o comportamento dos componentes é interdependente, de modo que a mudança no comportamento de uma parte altera o comportamento de outras. Assim, os sistemas são auto-organizadores [*self-organizing*] por causa da integração e interdependência das funções componentes. (Bechtel & Richardson, 1993, p. 150).

Adicionamos a noção de um sistema ‘cibernético’, porque a hipótese CLAW propõe um sistema que opera de acordo com um *feedback* negativo. Assim, parece-nos que a expressão ‘sistema cibernético funcionalmente integrado’ captura bem a natureza do sistema que é proposto pela hipótese CLAW. Esta característica do sistema está de certo modo presente, ainda que implícita, no modo como Bechtel e Richardson tratam dos sistemas funcionalmente integrados.

É importante ressaltar que não se trata de explicar em termos funcionais a capacidade sistêmica que temos em vista aqui apelando *apenas* às capacidades das partes. Caso procedêssemos dessa maneira, estaríamos assumindo que o sistema de nosso interesse pode ser compreendido a partir de uma decomposição simples, trivial, onde o

comportamento sistêmico seria localizado inteiramente em uma ou mais partes componentes (e poderia ser representado, por exemplo, conforme modelo I, da Figura 3).

No sistema CLAW, a influência da organização sobre o comportamento das partes desempenha também papel relevante na compreensão da capacidade sistêmica. Como já apontamos acima, tanto a decomposição quanto a integração desempenham papéis relevantes na construção do nosso modelo do sistema CLAW. Por isso, em nosso entendimento, a capacidade do sistema é explicável pelas (i) capacidades das partes e pela (ii) influência da organização sobre o comportamento das partes. Um sistema deste tipo pode ser representado pelo modelo II da Figura 3.

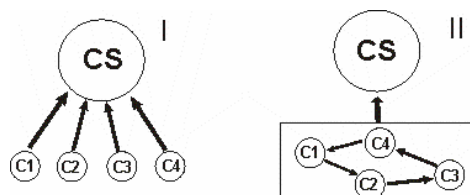


Figura 3. Dois tipos de sistema. I. um sistema decomponível simples. II. Um sistema integrado, no qual uma capacidade sistêmica é o resultado das interações entre as capacidades das partes componentes. CS – capacidade sistêmica. Cn – capacidade da parte n (Figura construída pelos autores).

Tendo em vista o aspecto da integração, na próxima seção apresentaremos nossa discussão sobre a decomposição no sistema CLAW.

5.3. Decomposições possíveis do sistema CLAW

O sistema CLAW é composto pelos elementos apresentados na figura 2: a radiação solar que interage com o sistema, as nuvens, os gases que participam da cadeia de reações que levam do DMSP aos NCN, os gases que se agregam aos NCN (como o vapor d'água), as algas oceânicas que liberam o DMS, os organismos marinhos que participam das interações tróficas com as algas etc.

A esta altura, cabe a seguinte colocação. É possível transpor as discussões em torno de decomposição do sistema Gaia, seguindo Volk, para o sistema CLAW? Para responder a esta questão, consideremos as três decomposições que Volk destaca (ciclos, guildas bioquímicas e reservatórios primários) e como elas podem ser aplicadas ao sistema CLAW.

Primeiramente, consideremos os *ciclos* (ou *ciclos biogeoquímicos*). A decomposição em ciclos biogeoquímicos parece interessante, de fato, sobretudo para o sistema Gaia como um todo. Porém, o sistema proposto pela hipótese CLAW cortaria, por assim dizer, tais ciclos ao meio, deixando partes importantes destes de fora. Por exemplo, o ciclo da água estaria parcialmente incorporado ao sistema CLAW, porém, boa parte dele estaria excluído. O próprio ciclo do enxofre é apenas parcialmente representado pelo sistema CLAW, na medida em que a dinâmica do enxofre nos continentes não é levada em consideração no sistema. Assim, este não parece ser o melhor modo de decompor o sistema CLAW, não obstante sua potencial importância na modelagem do sistema Gaia como um todo. A partir disto, podemos inferir que um requisito importante que uma decomposição deve satisfazer para ser incorporada a uma análise funcional e mecanística do sistema Gaia ou de seus subsistemas é que os componentes estejam inteiramente contidos no sistema de interesse.

O segundo modo de decomposição consistiria em considerar *guildas bioquímicas* como as partes do sistema CLAW. Seguindo este critério de decomposição, o sistema seria composto por fotossintetizadores (micro- e macro-algas), respiradores (zooplâncton e organismos do nécton), os decompositores (organismos do fundo oceânico) etc. Esta decomposição, conforme apontamos acima, na seção 4.1, por estar focada essencialmente nos organismos, não incorpora adequadamente os componentes físico-químicos do sistema, como as nuvens, o oceano e a atmosfera. Uma possível solução para este problema seria aquela sugerida por Volk (e que comentamos acima, na seção 4.1), de combinar a decomposição em guildas com a decomposição em ciclos. Entretanto, mesmo após a construção de uma decomposição híbrida em termos de guildas e ciclos, persistiria a dificuldade de que o ciclo do enxofre não estaria contido no sistema CLAW, mas seria cortado ao meio, na medida em que, como já apontamos, a dinâmica continental do enxofre não é representada no sistema CLAW.

Por estas razões, estes dois modos de decompor o sistema CLAW não parecem adequados para os nossos propósitos aqui. Voltemo-nos, assim, para a decomposição em termos de *reservatórios primários*. Esta decomposição dividiria o sistema CLAW em atmosfera, oceano e seres vivos. Cada um destes, por sua vez, poderia ser decomposto em outros elementos. Vejamos quais seriam os componentes de cada um deles. A atmosfera

seria constituída pela radiação solar entre a baixa atmosfera e a superfície oceânica, o DMS oxidado na atmosfera e todos os outros compostos derivados, os NCN e, por fim, as nuvens sobre o oceano (que constituem o *explanandum* do modelo). O oceano seria constituído, por sua vez, pelas porções de água aquecidas pela radiação solar, ao mesmo tempo em que seria o substrato físico-químico para a rede trófica marinha e, em especial, as algas que liberam DMS. Por fim, a terceira categoria, os seres vivos, teria influência sobre os outros dois reservatórios. Os organismos-chave (*key-parts*) são, neste modelo, as algas oceânicas. Este parece ser o modo mais adequado de decompor o sistema, pois, além de simples, ele incorpora integralmente todos os elementos do mesmo. Por isso, este será o modo adotado para a decomposição do sistema CLAW.

5.4. Análise funcional do sistema CLAW

Em primeiro lugar, precisamos dizer que o modelo que apresentaremos a seguir consiste apenas numa aproximação. Não temos a pretensão de dar a última palavra sobre a análise funcional aplicada a Gaia (se é que isso pode existir), até porque pretendemos oferecer a primeira, até onde temos conhecimento. Nesses termos, propomos, um modelo funcional para o sistema CLAW, lançando mão da perspectiva de Cummins (1975[1998]) (ver Figura 4).

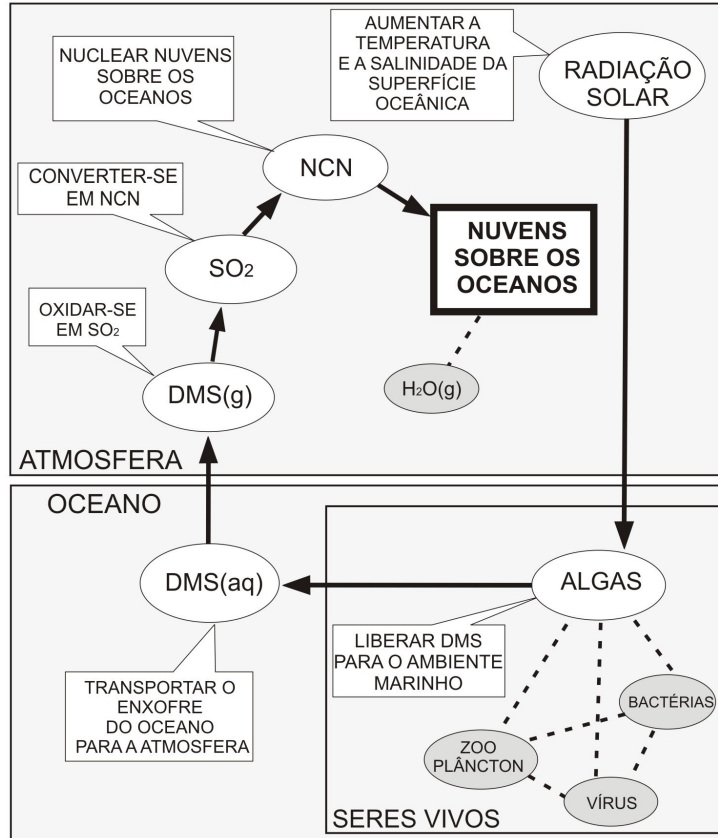


Figura 4. Um modelo de aplicação da análise funcional de Cummins ao sistema CLAW, decomposto em dois níveis. No primeiro nível há três componentes (atmosfera, oceano e seres vivos), seguindo a decomposição em reservatórios primários de Volk (1998). No segundo nível, os reservatórios são decompostos em partes componentes (as elipses brancas), as quais atribuímos função. As setas indicam relações causais entre os componentes, os balões indicam as funções (*sensu* Cummins, [1975]1998) de cada um dos componentes, o quadrado ao centro de borda espessa representa o explanandum da análise funcional, as elipses cinza e as linhas tracejadas, representam, respectivamente, entidades e relações que não foram levadas em consideração na aplicação da análise funcional. Algumas etapas do processo foram suprimidas ou simplificadas. Para maiores explicações, ver corpo do texto.

No esquema apresentado, as capacidades das partes componentes, assim como a própria organização do sistema, explicam a realização da capacidade sistêmica: a produção de nuvens sobre os oceanos.

O sistema está decomposto em dois níveis. Num primeiro nível, a decomposição se dá em termos de reservatórios primários (oceano, atmosfera e seres vivos). Os seres vivos formam uma parte que tem como substrato o oceano. Num segundo nível, cada um dos reservatórios está dividido em outros componentes. As capacidades dos componentes (as funções) às quais apelamos para explicar a capacidade sistêmica, estão neste segundo nível de organização hierárquica. Recorremos às capacidades deste nível, precisamente, por

conta de que o interesse por uma estratégia analítica, como afirma Cummins, é proporcional ao grau em que as capacidades analisadoras são de tipo diferente, e menos sofisticadas, do que as capacidades analisadas. Caso tomássemos os reservatórios como os componentes do sistema, estaríamos reduzindo a diferença de tipo e complexidade entre as capacidades analisadoras e as capacidades analisadas, já que o primeiro nível de decomposição está muito próximo ao nível do sistema como um todo. Como resultado, recorrer a função neste nível seria menos apropriado do que no nível que escolhemos.

O papel da organização do sistema aparece quando consideramos que as capacidades das partes não contribuem de modo isolado para a realização da capacidade sistêmica. Ao invés disso, as partes estão integradas entre si, de modo que a forma de organização do todo é imprescindível para a realização da capacidade sistêmica.

Estas considerações recebem apoio de argumentos apresentados por Craver & Bechtel (2006) sobre as noções de mecanismo e explicação mecanística. Para estes autores, a noção de mecanismo possui quatro aspectos, sobre os quais discorreremos brevemente a seguir: aspecto fenomenal, aspecto causal, aspecto componencial e aspecto organizacional.

Todos estes aspectos podem ser percebidos no sistema CLAW⁸³. O aspecto fenomenal diz respeito ao fenômeno produzido pelo mecanismo como um todo. Mecanismos são mecanismos dos fenômenos que eles produzem. No nosso modelo, o fenômeno produzido são nuvens sobre os oceanos. O aspecto componencial está ligado ao fato de que mecanismos tem partes componentes. As partes do mecanismo, como enfatizam Craver & Bechtel (2006, p. 470) são aquelas que são relevantes para a explicação do fenômeno produzido pelo mecanismo. Este aspecto evidencia-se em nosso modelo pelo fato de que recorremos apenas às capacidades daquelas partes relevantes para a produção do fenômeno sistêmico (que estão representadas pelas elipses brancas). O aspecto causal está relacionado às ações e interações das partes do mecanismo. Em nosso modelo, por exemplo, a incidência da radiação solar sobre a superfície oceânica *causa* um aumento da temperatura e da salinidade na água. Isto por sua vez, *causa* a liberação de DMS pelas algas. Por fim, o aspecto organizacional consiste, grosso modo, em como os componentes do mecanismo e suas relações causais estão organizados espaço-temporalmente na produção

⁸³ O que permite-nos supor, inclusive, que ele pode ser tratado também como um mecanismo. Contudo, a fim de manter consistentemente a terminologia, continuaremos usando apenas sistema CLAW.

do fenômeno. Evidentemente, este aspecto é de fundamental importância para a compreensão do modelo funcional do sistema CLAW, na medida em que o fenômeno produzido pelo sistema só o será num determinado modo de organização e disposição espaço-temporal dos componentes, i.e. o modo como estão organizados, a radiação solar incidente, as algas oceânicas, a taxa de volatilização do DMS para a atmosfera etc⁸⁴.

Podemos perceber ainda que as duas estratégias propostas por Cummins, a estratégia analítica e a estratégia da instanciação (ver seção 3), se conectam no nosso modelo. Tal conexão se dá ao nível dos compostos químicos apontados como componentes do sistema, na Figura 4 (DMS, SO₂, NCN). Por exemplo, podemos dizer que a função do composto é oxidar-se, como fazemos para o DMS(g), se isso contribui para a realização da capacidade sistêmica a ser explicada, e, além disso, obedece a todos os requisitos apontados por Cummins para a aplicação da análise funcional. Porém, se quisermos explicar a própria capacidade do composto de oxidar-se, precisaremos recorrer à estratégia de instanciação. Este ponto pode ser expresso do seguinte modo: Oxidação como *explananda* figura numa análise funcional da capacidade sistêmica a ser explicada, enquanto oxidação como *explanandum* figura numa explicação dedutivo-nomológica da disposição de oxidar-se, de um determinado composto.

É possível que uma analogia possa contribuir para a compreensão do sistema que estamos a modelar. Parece bastante adequada a analogia com a linha de produção de uma fábrica, um exemplo que ilustra bem a estratégia da análise funcional, de acordo com o próprio Cummins (1975[1998], ver seção 3). Do mesmo modo que a capacidade de produzir o produto final em uma linha de produção é o resultado das capacidades dos componentes individuais, a capacidade do sistema CLAW de produzir nuvens é o resultado da ação coordenada e integrada das partes componentes do sistema. As funções são as capacidades das partes às quais recorreremos para explicar a capacidade sistêmica. Nas palavras de Cummins:

Nós podemos explicar a capacidade da linha de produzir o produto – i.e., explicar como ela é capaz de produzir o produto – mediante o apelo a certas capacidades dos

⁸⁴ Parece possível interpretar o papel da organização como uma determinação descendente do sistema sobre suas partes componentes (El-Hani & Queiroz, 2005). Contudo, não perseguiremos este caminho aqui.

trabalhadores/máquinas e de sua *organização numa linha de montagem*. Contra este pano de fundo, nós podemos selecionar uma certa capacidade de uma ação individual que é sua função na linha. Das muitas coisas que ela faz e pode fazer, sua função na linha é fazer qualquer coisa à qual nós apelamos para explicar a capacidade da linha como um todo. (Cummins, 1975[1998], p. 188, ênfase dos autores)

Como observa Cummins, no contexto de sua abordagem, função é uma atividade qualquer de uma parte componente que contribui para a realização de uma capacidade do sistema que a contém. Esta concepção de função, como apontamos brevemente acima, é essencialmente diferente da concepção etiológica selecionista de Wright, que toma função como o que explica por que algum item existe.

Da perspectiva de Cummins, nos parece que o sistema CLAW pode ser tratado metaforicamente como uma linha de montagem auto-regulada. Neste tipo de sistema, vários componentes estão integrados entre si e a operação coordenada de cada um e de todos resulta no fenômeno sistêmico a ser explicado. Além disso, a auto-regulação do sistema se expressa pelo fato de que a produção causal do fenômeno de interesse pelo sistema, tem impacto (seja de restrição ou de amplificação) sobre sua própria produção. Em outras palavras, trata-se de um sistema cibernético de controle (*feedback* negativo) ou de amplificação (*feedback* positivo).

No caso de CLAW, estas considerações são bastante apropriadas. O aspecto da ‘linha de montagem’ é bastante evidente. Cada um dos subsistemas possui uma capacidade (*output*) que é estímulo (*input*) para a realização da capacidade do subsistema seguinte na linha. Por exemplo, a capacidade da radiação solar de aquecer o oceano e aumentar a temperatura e a salinidade do meio é um estímulo para o aumento da síntese de DMSP, e em consequência, para a liberação de DMS para o oceano, pelas algas. A volatilização do DMS para a baixa atmosfera só ocorre, por sua vez, se o processo anterior, i.e. sua liberação para o ambiente marinho, pelas células de algas, tiver ocorrido. Em suma, cada passo do processo oferece as condições necessárias para a realização do passo seguinte. O aspecto da auto-regulação também pode ser percebido sem dificuldade. O aumento na produção de nuvens inibe a própria produção de nuvens, na medida em que, quanto mais

nuvens estiverem presentes sobre os oceanos, menor será a radiação solar incidente sobre a superfície oceânica e, portanto, de acordo com a hipótese CLAW, menor será a liberação de DMS pelas algas. Em consequência, menos nuvens se formarão, o que fecha o ciclo.

5.5. Uma contribuição da análise funcional de Cummins para a superação da tensão entre Gaia e o darwinismo

Como já apontamos brevemente, antes neste artigo, dentro da perspectiva da análise funcional, é irrelevante se um item ao qual atribuímos função, no contexto de Gaia, é um produto ou um subproduto de processos biológicos. Em termos evolutivos, é irrelevante para a atribuição de função se um item foi selecionado evolutivamente e, por isso, traz vantagens para os sistemas que o possuem, ou se ele é um mero efeito colateral de processos biológicos, estes sim, selecionados evolutivamente.

O DMS é um mero sub-produto da demetilação enzimaticamente mediada do DMSP produzido pelas algas, como já apontamos. O DMSP tem sido indicado de fato, como uma substância importante no metabolismo das algas, existindo evidências de que ele cumpre, no mínimo, quatro papéis: (1) é um soluto que contribui para o equilíbrio osmótico celular (Stefels, 2000; Kirst, 1996); (2) é um antioxidante (Sunda et al., 2002); (3) é um inibidor da cisteína e da metionina (através de um mecanismo de superabundância⁸⁵, cf. Stefels, 2000, p. 192); e (4) é um mediador de informação química para a defesa contra predadores (Steinke et al., 2002; Stefels, 2000; Wolfe et al., 1997). Estas quatro funções fisiológicas parecem ser importantes para o sucesso reprodutivo das algas e, por isso, é plausível que a síntese de DMSP tenha sido selecionada evolutivamente⁸⁶.

O fato de o DMS ser um sub-produto não significa que não possamos apelar, nos termos da análise funcional, a uma certa capacidade sua para explicar uma capacidade do sistema que o contém. A capacidade das moléculas de DMS de atuar como NCN contribui para uma capacidade do sistema CLAW, a saber, produzir nuvens sobre os oceanos. Neste sentido, não devemos supor que capacidades como as explicadas pelo programa Gaia

⁸⁵ Traduzimos como “mecanismo de superabundância” a expressão inglesa *overflow mechanism*. Assinalamos que não encontramos uma tradução para a língua portuguesa desta expressão, em outro trabalho, razão pela qual nós próprios realizamos a tradução.

⁸⁶ Para um interessante tratamento evolutivo das vantagens seletivas do DMSP no metabolismo das algas, ver Hamilton & Lenton (1998).

devem ser causadas pela seleção natural. Elas podem ser um mero produto colateral da seleção, conforme notou Lenton:

A suposição implícita, mas falsa, é que a regulação biótica só pode surgir de características que tenham evoluído por seleção natural, baseada em suas conseqüências ambientais. Em outras palavras, a regulação deve ser selecionada positivamente [*selected for*]. Não se reconhece, assim, que a regulação é uma propriedade emergente em muitos sistemas nos quais não há seleção ativa a favor da regulação [...]. De fato, muitas (e talvez a maioria das) retroalimentações bióticas globalmente importantes parecem ser baseadas em produtos colaterais da seleção – por exemplo, aqueles gerados pela produção de sulfeto de dimetila [DMS] [...]. Isso pode levar a um tipo de regulação diferente daquele do modelo do mundo das margaridas original, com o ambiente sendo mantido num estado limitante, que, por sua vez, pode ser notavelmente resistente e resiliente à mudança. (Lenton, 2004, pp. 20-21)

Aqui, Lenton se aproxima de uma idéia exposta por Volk (1998, 2004), para o qual “Gaia é a Vida em um mundo desolado de produtos colaterais” (“Gaia is Life in a wasteworld of by-products”). Volk (1998, p. 240) faz referência ao trabalho de Ken Caldeira (Volk, 1998, p. 240), cujo estudo oferece boas evidências a favor da idéia de que o fitoplâncton deve sintetizar o precursor do DMS, o DMSP, apenas porque este último composto beneficia seu próprio crescimento individual enquanto está no interior do organismo, o que é independente da complexa rota seguida pelo composto fora da célula, nos oceanos e, posteriormente, na atmosfera. De fato, como apontamos acima, ao DMSP tem sido atribuídas diversas funções no metabolismo das algas.

Note-se que não é um objetivo das algas liberar DMS. Elas simplesmente o fazem devido à predação por zooplâncton, e infecção por vírus e bactérias (Simó, 2001, p. 290). Assim, são as funções apontadas do DMSP, que explicam o aumento da frequência e a posterior manutenção do mecanismo biológico produtor deste composto nas populações de algas que o sintetizam, e não a existência de um efeito climático do DMS, um composto derivado.

Para Volk (1998) e Lenton (2004), a auto-regulação seria, então, muito mais um sub-produto da interação entre organismos e seu ambiente do que um objetivo do sistema Gaia. Idéias similares foram defendidas por Stuart Kauffman (1986, *apud* Bechtel & Richardson, 1993, pp. 226-7) acerca da auto-organização dos sistemas de regulação gênica. Para Kauffman, os evolucionistas tendem a atribuir muito poder à seleção natural, entendendo-a como uma força capaz de gerar quase qualquer estado genético possível que seja altamente adaptativo. Ainda que esta crítica atinja especificamente um tipo particular de evolucionista, comprometida com a visão conhecida como adaptacionismo (ver, e.g., Gould e Lewontin, [1978]1994), seu argumento não deixa de ser interessante por este pequeno problema:

Uma implicação geral [desta classe de modelos] é que um diagrama de circuitos regulatórios genéticos complexos se tornará arbitrariamente próximo de propriedades organizacionais típicas do sistema não-selecionado. Desse modo, para sistemas genômicos suficientemente complexos, predicções das propriedades que são tipicamente esperadas, na ausência de seleção adicional àquela realmente encontradas em organismos, serão razoavelmente acuradas. (Kauffman 1986, *apud* Bechtel & Richardson, 1993, p. 226-7).

Sobre este argumento de Kauffmann, Bechtel & Richardson comentam:

O que *parecia* requerer explicação era a capacidade da seleção de manter o sistema regulatório. Se Kauffmann estiver correto, no entanto, isso não virá a mostrar-se um problema. Na medida em que o sistema regulatório é estável, ele o é *independentemente* da seleção; a estabilidade vem a ser devida a aspectos auto-organizadores da própria rede genética. (Bechtel & Richardson, 1993, p. 227, ênfase no original)

Apesar de ter em foco diferentes questões científicas, o argumento de Kauffman converge para o mesmo ponto do argumento de Lenton, no sentido de que ambos reconhecem o papel limitado da seleção natural para explicar o comportamento de certos sistemas regulatórios auto-organizados. Nestes casos, conforme os argumentos dos autores, precisaremos de um referencial teórico no qual as propriedades do sistema regulatório auto-organizado que se deseja explicar não sejam dependentes de processos históricos. Especificamente quanto ao conceito de função, não podemos explicar as propriedades funcionais destes sistemas apelando às abordagens etiológicas selecionistas sobre função (como a abordagem de Wright, [1973]1998), na medida em que elas se ancoram fortemente na seleção natural darwiniana para explicar porque certo item tem determinada função num sistema. Em vez disso, precisamos de um referencial sobre explicações e atribuições funcionais que não se apóie na seleção natural. A abordagem de Cummins (1975[1998]) tem essa natureza. Como vimos, ao longo deste artigo, a função é, para Cummins, uma capacidade qualquer de um componente à qual apelamos para explicar uma capacidade complexa do sistema que o contém. A aplicação da análise funcional de Cummins a Gaia, contribui, assim, também, para uma superação da tensão entre aquele programa de pesquisa e o darwinismo.

6. Limites do modelo

Como esta é uma primeira aproximação do problema, o modelo que propomos apresenta limitações. Por exemplo, tratamos como caixas-pretas muitos dos elementos do sistema CLAW. Dificilmente poderíamos dar conta de todos os detalhes da dinâmica interna de cada componente do sistema. Isso tornaria ainda mais difícil o processo de modelagem do sistema complexo com que estamos lidando.

Além disso, não temos ainda subsídios para responder de modo inequívoco se o sistema proposto por CLAW é decomponível ou, diferentemente, um sistema integrado. Preferimos aqui trilhar um caminho intermediário, assumindo que o sistema é parcialmente decomponível, porém também é integrado. Isso parece capturar melhor a dinâmica do sistema CLAW do que a simples decomponibilidade deste. A nossa escolha do modo de decomposição do sistema CLAW, pode ser questionada, seja por que podemos ter

escolhido um modo de decomposição ruim (dentre outros possíveis), seja por que o sistema não é, de fato, decomponível. A esta possível objeção, contudo, oferecemos a seguinte resposta. Como já apontamos acima, assumir que um sistema é decomponível é um meio de descobrir que ele não é (ver seção 4 e Bechtel & Richardson, 1993, p. 235). Em outras palavras, a escolha de um certo modo de decomposição, que deriva da própria assunção de decomponibilidade do sistema, é um modo de verificar ou refutar a si mesma. O que determinará se uma decomposição é adequada ou não (ou mesmo se o sistema é decomponível) são os seus resultados heurísticos para a compreensão do funcionamento do sistema. Por isso, num primeiro instante, é necessário assumir a decomponibilidade e realizar uma decomposição.

Um outro aspecto a ser notado é que as limitações aqui apontadas não são, contudo, exclusivas do nosso modelo, mas são, antes, dificuldades enfrentadas pela comunidade científica dedicada ao tema. De um modo geral, podemos dizer que o esforço dos cientistas dedicados ao estudo da conexão entre algas e nuvens, tem sido o de abrir as caixas-pretas da hipótese CLAW, construindo uma imagem mais complexa das relações entre as algas, a ecologia marinha, a química atmosférica e a formação de nuvens (para maiores discussões, ver por exemplo, Ayers & Caine, 2007; Vallina et al., 2007; Simó, 2001; Andreae & Crutzen, 1997).

7. Considerações finais

Neste trabalho, oferecemos uma primeira aplicação da abordagem analítica de Robert Cummins ([1975]1998) sobre as funções, a um sistema proposto pelo programa de pesquisa Gaia, especificamente pela hipótese CLAW (Charlson et al, 1987). Este trabalho traz uma contribuição no sentido de que permite compreender melhor como atribuir função a componentes e como analisar funcionalmente o sistema Gaia, ou algum de seus subsistemas.

Ainda que haja limites, conforme apontamos, no modelo do sistema CLAW aqui apresentado, pensamos que a motivação geral exposta neste artigo, qual seja, a de aplicar o referencial sobre função de Robert Cummins a Gaia e a seus subsistemas, é preservada diante de quaisquer objeções que possam ser levantadas contra os modelos em si mesmos. Neste sentido, é extremamente salutar para a linha de pesquisa que queremos iniciar que se

levantem objeções ao modelo e se envidem esforços no detalhamento das relações internas àqueles componentes do sistema que foram propositalmente tratados como caixas-pretas.

A hipótese apresentada por Charlson et al (1987) representou um importante avanço científico, na medida em que construiu um belo modelo de integração heurísticamente rica entre elementos aparentemente desconexos do mundo natural (como algas oceânicas, compostos químicos voláteis, nuvens e radiação solar). Como consequência, há também uma integração de campos científicos que antes estudavam os componentes isolados (os biólogos estudavam as algas; os geofísicos, as nuvens; os geoquímicos, o DMS etc.). A proposta de Charlson et al. (1987) fixou uma série de questões empíricas e teóricas para serem atacadas por cientistas de várias áreas, e que integram-se numa área de pesquisas extremamente importante desde o início da década de 1990, conhecida como Conexão algas-nuvens (para maiores detalhes, ver Nunes Neto et al, 2008). Mesmo que tenha se mostrado demasiadamente simples, diante de avanços subseqüentes do conhecimento, a hipótese proposta por Charlson e colaboradores, em 1987, desempenhou um importante papel heurístico na pesquisa sobre interações entre biosfera, oceanos e atmosfera. A hipótese CLAW mostrou, por exemplo, que relações específicas dentro do sistema precisariam ser melhor compreendidas, até mesmo para o seu próprio teste (ver Ayers & Cainey, 2007).

Propusemos neste trabalho que o sistema CLAW deve ser concebido como um sistema funcionalmente integrado, porém ainda assim, decomponível. As capacidades das partes componentes do sistema CLAW são tratadas como as funções destas no sistema e explicam, juntamente com a organização do sistema, a realização da capacidade sistêmica em questão, a saber, a produção de nuvens sobre os oceanos. A partir deste estudo de caso, concluímos que a análise funcional de Cummins fornece um quadro teórico consistente para a construção de explicações funcionais e a atribuição de funções no contexto de Gaia, também podendo contribuir, assim, para a superação do problema das explicações teleológicas no programa de pesquisa. A perspectiva de Cummins sobre as funções, se aplicada a Gaia, pode, também oferecer uma importante contribuição para a superação da tensão entre Gaia e o darwinismo, como apontamos acima.

Esperamos com este artigo suscitar novas aplicações do referencial de Cummins a outros sistemas ou mecanismos propostos por este programa de pesquisa ou, em termos mais gerais, pela Ciência do Sistema Terra.

Agradecimentos

N.F.N.N. agradece ao CNPq, pela bolsa de mestrado concedida durante a realização deste trabalho e à FAPESB, pelo financiamento do projeto de pesquisa. C.N.E.H. agradece ao CNPq por bolsas de produtividade em pesquisa, e à FAPESB e ao CNPQ, pelo financiamentos de projetos de pesquisa.

Referências

Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press. 1998.

Almeida, A.M. *O papel funcional da diversidade biológica: uma análise da atribuição de função à biodiversidade na ecologia das últimas décadas*. Salvador: Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Dissertação de Mestrado, 2004.

Andreae, M.O.; Crutzen, P.J. Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, vol. 276, p. 1052-1058, 1997.

Andreae, M.O.; Rosenfeld, D.; Artaxo, P.; Costa, A.A.; Frank, G.P.; Longo, K.M.; Silva-Dias, M.A.F. Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science*, vol. 303, n. 27, pp. 1337-1342, 2004.

Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, 2002.

Artaxo, P.; Gatti, L.V.; Leal, A.M.C; Longo, K.M.; Freitas, S.R.; Lara, L.L.; Pauliquevis, T.M.; Procópio, A.S.; Rizzo, L.V. Química atmosférica na Amazônia: A floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazônica*. Vol 35, n. 5, pp. 185-196, 2005.

Ayers, G.P. & Cainey, J.M. The CLAW hypothesis: a review of the major developments. *Environmental Chemistry*, vol. 4, nº 6, 366–374, 2007.

Bechtel, W.; Richardson, R. *Discovering Complexity: Decomposition and Localization as Strategies in Scientific Research*. Princeton – NJ: Princeton University Press, 1993.

Charlson, R.J.; Lovelock, J.E.; Andreae, M.O.; Warren, S.G. Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate. *Nature*, vol 326, n° 6114, pp. 655-661, abril, 1987.

Charlson, R.J.; Seinfeld, J.H.; Nenês, A.; Kulmala, M.; Laaksonen, A.; Facchini, M.C.; Reshaping the Theory of Cloud Formation. *Science*, vol. 292, n. 5524, pp. 2025-2026, 2001.

Chediak, K. Análise do conceito de função a partir da interpretação histórica. In: Prestes, M.E.; Martins, L.A.C.P.; Stefano, W. (eds). *Filosofia e História da Biologia I. Seleção de Trabalhos do IV Encontro de Filosofia e História da Biologia*. São Paulo. Fundo Mackenzie de Pesquisa. MackPesquisa. Pp. 161-174. 2006.

Craver, C. & Bechtel, W.. Mechanism, in: S. Sarkar & J. Pfeifer (eds.), *Philosophy of science: an encyclopedia*. New York: Routledge, pp. 469-478, 2006.

Cummins, R. Functional Analysis. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 169-196, [1975]1998.

Cummins, R. *The Nature of the Psychological Explanation*. Cambridge, MA: MIT Press, 1983.

Cummins, R. Neo-teleology. In: Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, pp. 157-172, 2002. Disponível em <https://netfiles.uiuc.edu/rcummins/www/HomePage/Cummins.html>>. Acesso em: 16 mar. 2006.

El-Hani, C.N. & Queiroz, A.J. Modos de irreduzibilidade das propriedades emergentes. *Scientiae studia*, vol. 3, n. 1, pp. 9-41, 2005.

Feest, U. Functional Analysis and the Autonomy of Psychology. *Philosophy of Science*, 70, pp. 937-948, 2003.

Hempel, C. & Oppenheim, P. Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science*, vol. 15, n° 2, pp. 135-175, abril, 1948.

Hitchcock, D. & Lovelock, J.E. Life Detection by Atmospheric Analysis. *Icarus*, 1967

IPCC, 2007: *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Disponível em www.ipcc.ch. Acessado em 20 de outubro de 2007.

Kirst, G.O. Osmotic adjustment in phytoplankton and macroalgae: the use of dimethylsulfoniopropionate (DMSP). In: Kiene, R.P.; Visscher, P.T.; Keller, M.D.; Kirst,

G.O. (Eds.). *Biological and Environmental Chemistry of DMSP and Related Sulfonium Compounds*, Plenum Press: New York, pp. 121–129, 1996.

Kitcher, P. Function and Design in: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 479-503, [1993] 1998.

Kump, L.R.; Kasting, J.F.; Crane, R.G. *The Earth System*. Prentice Hall: New Jersey, 1999.

Kump, L.R & Pollard, D. Amplification of Cretaceous Warmth by Biological Cloud Feedbacks. *Science*, vol. 320, p. 195, 2008.

Lakatos, I. Falsification and the methodology of scientific research programmes [1970]. Vol. 1, pp. 8-101. in: Worrall, J.; Currie, G. (eds). *The methodology of scientific research programmes, Philosophical Papers*, vol. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 2 vols.

Lenton, T.M. Clarifying Gaia: Regulation with or without Natural Selection. 2004. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Lenton, T. M. & van Oijen, M. Gaia as a complex adaptive system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. Vol. 357, pp. 683-695. 2002.

Lima-Tavares, M. *Gaia e Ciência: Uma Análise da Cientificidade da teoria Gaia de acordo com a Metodologia dos Programas de Pesquisa de Lakatos*. Salvador: Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Dissertação de Mestrado, 2003.

Lovelock, J. E.. Hands up for the Gaia hypothesis. *Nature*, vol. 344, pp.100-102, 1990.

Lovelock, J.E. Gaia um Modelo para a Dinâmica Planetária e Celular, in: Thompson, W. I. (Org.). *Gaia uma Teoria do Conhecimento*. São Paulo: Editora Gaia Ltda, pp. 77-90. [1990] 2000.

Lovelock, J.E. & Hitchcock, D. Detecting planetary life from Earth. *Science Journal*, april, 1967.

Lovelock, J. E.; Margulis, L. Atmospheric homoestasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. *Tellus* . vol. 26. n° 1-2. pp. 2-10. 1974a.

Lovelock J.E. & Margulis, L. Homeostatic tendencies of the Earth's atmosphere. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, V. 5, pp. 93-103, 1974b.

Margulis, L.; Lovelock, J. E. Biological modulation of the atmosphere. *Icarus*, vol.21, pp. 471-489, 1974.

Mayr, E.. *Toward a New Philosophy of Biology: Observations of an Evolutionist*. Cambridge-MA: Harvard University Press, 1988.

Mayr, E. *Biologia, Ciência Única*. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.

Nunes Neto, N.F. Explicações Teleológicas na Teoria Gaia. 109f. Monografia (Bacharelado) – Instituto de Biologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia, Teleologia e Função. *Episteme* (Brasil), vol. 11, n. 23, pp. 15-48, 2006.

Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Teleologia na teoria Gaia. In: Martins, R.A.; Silva, C.C.; Ferreira, J.M.; Martins, L.A-C.P (eds.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul. Seleção de trabalhos do 5º Encontro*. Campinas: Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul (AFHIC), pp. 331-340, 2008.

Nunes Neto, N.F.; Carmo, R.S.; El-Hani, C.N. Mudanças Climáticas e Conexão Algas-Nuvens. In: Seabra, G. *Conferência da Terra: Fórum Internacional de Meio Ambiente*. João Pessoa: UFPB, pp. 133-141, 2008.

Odum, E.P. *Ecologia*. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988.

Pauliquevis, T.; Artaxo, P.; Oliveira, P.H.; Paixão, M. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico. *Ciência & Cultura*, vol. 59, n. 3, pp. 48-50, 2007.

Pessoa Jr., O. Medidas Sistêmicas e Organização. In: Debrun, M.; Gonzáles, M.E.; Pessoa Jr., O. (eds.). *Auto-Organização*. Campinas: CLE, vol. 18, pp. 129–161, 1996.

Queiroz, J. & El-Hani, C.N. Semiosis as an Emergent Process. *Transactions of the Charles S. Peirce Society*, vol. 42, n. 1, 2006.

Ricklefs, R.E. *A Economia da Natureza*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.

Salmon, W.C. *Four Decades of Scientific Explanation*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1990.

Schellnhuber, H.J. & Held, H. *How fragile is the Earth System? In: Managing the Earth – The Linacre Lectures*. Oxford: Oxford University Press, 2002

Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. Cambridge-MA: The MIT Press, 2004.

Simó, R. Production of atmospheric sulphur by oceanic plankton: biogeochemical, ecological and evolutionary links. *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 16, n. 6, pp. 287-294, 2001.

Stefels, J. Physiological aspects of the production and conversion of DMSP in marine algae and higher plants. *Journal of Sea Research*, vol. 43, pp. 183–197, 2000.

Steinke, M.; Malin, G.; Liss, P.S. Trophic interactions in the sea: an ecological role for climate relevant volatiles? *Journal of Phycology*, vol. 38, n. 4, pp. 630–638, 2002.

Sunda, W.; Kieber, D.J.; Kiene, R.P.; Huntsman, S. An antioxidant function for DMSP and DMS in marine algae. *Nature*, vol. 418, pp. 317–320, 2002.

Tickell, C. Gaia and the Human Species. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Tipler, P. *Física: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica*, vol. 1. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A. Tradução Horacio Macedo, 2000.

Vallina, S.M.; Simó, R.; Gassó, S.; Boyer-Montégut, C.; Del Rio, E.; Jurado, E.; Dachs, J. Analysis of a potential “solar radiation dose–dimethylsulfide–cloud condensation nuclei” link from globally mapped seasonal correlations. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 21, pp. 1–16, 2007.

Volk, T. *Gaia’s Body: toward a physiology of the earth*. New York: Copernicus. 1998

Von Bertalanffy, L. *General System Theory: Foundations, Development, and Applications*. London: Penguin, 1973.

Wilkinson, D.M. The fundamental processes in ecology: a thought experiment on extraterrestrial biospheres. *Biological Reviews*, vol. 78, pp. 171-179, 2003.

Wilkinson, D.M. *Fundamental Processes in Ecology: an Earth Systems approach*. Oxford: Oxford University Press, 2006.

Wolfe, G.V.; Steinke, M.; Kirst, G.O. Grazing-activated chemical defence in a unicellular marine alga. *Nature*, vol. 387, pp. 894–897, 1997.

Wright, L. Functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature’s Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 51-78, [1973]1998.

CAPÍTULO 4

Implicações de Gaia para o ensino de biologia⁸⁷

Resumo: Neste trabalho discutimos as implicações do programa de pesquisa científico Gaia para o ensino de ciências, especialmente o de biologia. Na medida em que Gaia já está presente nos livros didáticos de biologia do ensino médio, analisar as possíveis implicações educacionais de Gaia, assim como os modos pelos quais ela pode ser inserida no ensino, torna-se uma tarefa importante. Aqui, analisamos também aspectos gerais acerca da transposição didática do programa Gaia para o conhecimento escolar. Gaia pode ser uma interessante via de inserção de história e filosofia da ciência no ensino de ciências. Estudar um programa de pesquisa controverso e rico como Gaia, assim, pode proporcionar aos alunos uma boa compreensão do processo histórico de produção do conhecimento científico. Por fim, consideramos uma contribuição, assim como uma limitação de Gaia para o tratamento de questões ambientais.

Palavras-chave: Gaia, ensino de biologia, transposição didática, história e filosofia da ciência no ensino de ciências, meio ambiente

Abstract: In this work we discuss implications of the Gaia research programme for science teaching, especially biology. Since Gaia is already present in high school biology textbooks, to analyze the possible educational implications of the research programme, as well as the ways by which it can be inserted in classrooms, is a very important task. Here, we analyze also general aspects about the didactic transposition of Gaia for the school knowledge. Moreover, Gaia might be an interesting path to insert history and philosophy of science in the teaching of sciences. To study such a controversial and rich programme could, thus, led students to a good comprehension of the historical process that produces scientific knowledge. We consider, too, a contribution, as well as, a limitation offered by Gaia to deal with environmental issues.

Keywords: Gaia, biology teaching, didactic transposition, history and philosophy of science on science teaching, environment.

1. Introdução

Neste trabalho discutimos as relações do programa de pesquisa científico Gaia⁸⁸ com o ensino de ciências, em especial o de biologia. Mais especificamente, discutiremos, as implicações de Gaia para o ensino de biologia, assim como suas contribuições e limitações

⁸⁷ Este artigo será submetido a *Ciência & Educação*.

⁸⁸ Concebemos Gaia como um programa de pesquisa científico progressivo, nos termos da filosofia da ciência de Lakatos ([1970]1995), com base em trabalho anterior realizado em nosso grupo de pesquisa (Lima-Tavares, 2003), ao qual encaminhamos o leitor, para maiores detalhes. Com o objetivo de evitar repetições, usaremos a expressão “Gaia” ou “programa Gaia”, para nos referir ao programa de pesquisa científico.

para o tratamento de questões ambientais. Para isso, nos apoiamos parcialmente, nos argumentos expostos no capítulo 1 desta dissertação, bem como em outros trabalhos desenvolvidos em nosso grupo de pesquisa (Lima-Tavares & El-Hani, 2001; Carmo *et al*, no prelo; Guimarães, 2007; Guimarães *et al*, no prelo).

A discussão de questões sobre o ensino de conteúdos do programa Gaia mostra-se relevante por pelo menos três razões, sobre as quais discorreremos brevemente a seguir.

(i) Gaia toca em questões de extrema relevância na contemporaneidade, como as mudanças climáticas e as relações entre a vida e o ambiente físico-químico. Este programa de pesquisa oferece inclusive uma visão sistêmica sobre o nosso planeta, algo que não pode ser dispensado diante da mudança climática antropogênica em curso (Rosenzweig *et al*, 2008), que tem alcance global, e não afeta assim apenas partes do sistema Terra. Este é um importante desafio que nós, humanidade, deveremos continuar a enfrentar ao longo do próximo século (IPCC, 2007).

(ii) Gaia já se encontra presente nos livros didáticos de biologia do Ensino médio, conforme mostraram investigações prévias em nosso grupo de pesquisa (Carmo *et al*, 2007; no prelo). Desse modo é imprescindível avaliar de que modo Gaia é (e como deve ser) ensinada.

(iii) A inserção de Gaia no ensino escolar pode permitir a transmissão dos conteúdos científicos do programa de pesquisa, mas também pode ser uma boa oportunidade para suscitar discussões sobre o próprio processo de produção do conhecimento científico. Neste sentido, Gaia pode ser um interessante veículo de inserção da história e filosofia das ciências, no ensino médio.

Estas são apenas algumas, dentre muitas razões que poderiam ser levantadas, para justificar nossa empreitada aqui. Com base neste pressuposto, nosso primeiro passo neste artigo consistirá numa breve apresentação do programa Gaia. Em seguida, na seção três, discutiremos em linhas gerais aspectos relevantes acerca da inserção de Gaia no conhecimento escolar. Nesta seção destacamos as seguintes questões: a transposição didática de Gaia, as contribuições de Gaia para um ensino de ciências contextualizado histórica e filosoficamente e por fim, contribuições e limitações de Gaia para o tratamento de questões ambientais contemporâneas. Na seção quatro, lançamos nossas considerações finais.

2. O programa de pesquisa Gaia

Gaia é uma criação do químico inglês James Ephraim Lovelock (1919-), uma das principais autoridades científicas da atualidade em mudanças climáticas. Lovelock construiu uma carreira científica sólida, alicerçada em diferentes disciplinas científicas, a partir da década de 1940. Suas pesquisas, em áreas tão diversas quanto biomedicina, cibernética e química atmosférica, renderam-lhe um lugar de destaque na ciência do século XX. Entretanto, foi com suas idéias sobre Gaia que Lovelock tornou-se amplamente conhecido, sobretudo nos meios extra-científicos.

Um primeiro esboço do programa foi construído a partir de estudos realizados por Lovelock para a NASA, em parceria com a filósofa Dian Hitchcock, durante a década de

1960, com o objetivo de oferecer meios para a detecção de vida em outros planetas. O programa foi consideravelmente desenvolvido a partir da cooperação de Lovelock com a microbióloga norte-americana Lynn Margulis. Em conjunto, eles publicaram artigos em *Tellus* (Lovelock & Margulis, 1974) e *Icarus* (Margulis & Lovelock, 1974), onde desenvolvem e apresentam suas idéias acerca de Gaia com mais rigor e detalhes. Nestes artigos, os autores propõem que os seres vivos têm a capacidade de alterar seu ambiente de modo a manter as variáveis físico-químicas ambientais em um nível adequado para si mesmos.

De acordo com Lovelock (1990, p. 100) Gaia é “a teoria de um sistema em evolução — um sistema composto dos organismos vivos da Terra e de seu ambiente material, as duas partes sendo intimamente acopladas e indivisíveis”. Este “acoplamento” ocorre através de alças de retroalimentação negativas e positivas. A enorme quantidade de alças de retroalimentação existentes nos sistemas da Terra constitui uma rede extremamente complexa que resulta, em última instância, na regulação de variáveis ambientais ao nível global, como temperatura, composição química da atmosfera, salinidade e pH dos oceanos, entre outras. Esta regulação é vista como uma propriedade emergente do sistema (Lovelock, 1990; Lenton, 2004), sendo que os níveis em que estas variáveis são mantidas estão dentro de uma faixa de habitabilidade para os organismos.

O programa Gaia, no começo de sua história, foi recebido com entusiasmo por grupos ambientalistas e espiritualistas, ao passo que foi negligenciado pela comunidade científica (Tickell, 2004). Entretanto, à medida em que o programa foi sendo desenvolvido e refinado em seus fundamentos, e começou a gerar previsões bem-sucedidas, sobretudo a partir da década de 1980, a resistência da comunidade científica tem diminuído significativamente (Schneider *et al.*, 2004). Ainda que suscite controvérsias, atualmente, o programa Gaia compõe parte importante do conhecimento científico bem estabelecido sobre a Terra, assim como ilumina de modo heurísticamente rico os estudos sobre as relações entre a biota e o ambiente físico-químico (Kump *et al.*, 1999; Jacobson *et al.*, 2000; Wilkinson, 2006).

A perspectiva teórica proposta por Lovelock, inicialmente era vista como apenas mais uma idéia pseudocientífica, num período em que tais idéias pseudocientíficas eram abundantes (Tickell, 2004). Entretanto, como já afirmamos acima, Gaia tornou-se ao longo das décadas subsequentes um programa de pesquisa vigoroso (Lima-Tavares, 2003). O programa Gaia realizou previsões bem-sucedidas (ausência de vida em Marte), e elucidou mecanismos importantes (como parte importante da dinâmica do ciclo do enxofre). Mais exemplos podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1: Alguns exemplos de previsões novas derivadas do programa de pesquisa Gaia e de evidências empíricas que o apóiam (Preparada a partir de Guimarães *et al.*, no prelo)

Previsões novas	Apoio empírico e/ou papel heurístico
Ausência de vida em Marte e Vênus, com base na análise da composição química da atmosfera desses planetas, seguida de comparação com a atmosfera terrestre (Lovelock, 1965; Hitchcock & Lovelock, 1967).	Apoiada pelos resultados do envio a Marte pela NASA da sonda Mariner (décadas de 1960 e 1970) e da missão Viking (1975). A possibilidade de que exista vida em Marte ainda tem sido, contudo, objeto de pesquisa, em virtude da presença de metano em concentração relativamente constante em sua atmosfera e da possível

	existência de aquíferos subterrâneos (Atreya <i>et al.</i> , 2007). Caso a presença de metano nesse planeta seja atribuída à existência de seres vivos, e não a processos puramente geoquímicos, isso não fornecerá evidências contrárias, mas antes apoiará Gaia.
Atribuição de funções a gases de origem biológica encontrados na atmosfera, como metano (CH ₄), óxido nítrico (NO ₂), amônia (NH ₃) etc. (Lovelock & Lodge, 1972; Margulis & Lovelock, 1974)	Verificação da participação de compostos como, por exemplo, o metano em mecanismos de regulação de variáveis do ambiente físico-químico, como a concentração de O ₂ e a temperatura média global (Watson <i>et al.</i> , 1978, 1980).
Participação dos gases sulfeto de dimetila (DMS), iodeto de metila (CH ₃ I) e dimetil selênio (C ₂ H ₆ Se), na transferência em massa de elementos essenciais entre o mar e a terra (no caso do DMS, Lovelock <i>et al.</i> , 1972).	Por exemplo, evidências a favor do papel central do DMS na transferência de enxofre dos oceanos para a terra (Lovelock <i>et al.</i> , 1972).
Envolvimento do DMS de origem biológica em mecanismos de regulação da temperatura planetária, através de seu papel no processo de condensação do vapor d'água e, assim, de formação de nuvens sobre os oceanos (hipótese CLAW, derivada das iniciais dos autores de Charlson <i>et al.</i> , 1987).	Evidências a favor da atuação de compostos derivados da oxidação do DMS no ar sobre os oceanos como núcleos para a condensação do vapor d'água. Essa previsão do programa de pesquisa Gaia deu origem a um novo e importante tema de pesquisa, a conexão algas-nuvens (<i>cloud-algae link</i>) (Hamilton & Lenton, 1998; Simó, 2001; van Rijssel & Gieskes, 2002; Kloster <i>et al.</i> , 2005).
Proposição de compatibilidade entre Gaia e a teoria sintética da evolução, com base no desenvolvimento de modelos computacionais inspirados pelo 'Mundo das Margaridas' (Watson & Lovelock, 1983).	Simulações computacionais mostrando como a evolução dos seres vivos pode ser entendida em termos de um acoplamento com a evolução do ambiente físico-químico. Muitos desses modelos conciliam Gaia e a teoria sintética (Lenton & Lovelock, 2000, 2001).
Florestas boreais regulam seu clima regional do mesmo modo que o 'Mundo das Margaridas' (Lovelock, 2003).	O conhecimento decorrente dessa previsão, feita em 1988, é atualmente importante para a elaboração de modelos sobre o clima global (Lovelock, 2003).
A concentração de oxigênio se manteve em 21±5% durante os últimos 200 milhões de anos (Lovelock & Lodge, 1972).	Essa previsão se encontra em teste.

O uso do termo Gaia por Lovelock (a partir de uma sugestão do escritor William Golding) para nomear o programa de pesquisa trouxe dificuldades para a aceitação de suas idéias no âmbito científico. O termo Gaia, contudo, designa não apenas o programa de pesquisa proposto por ele, mas também o próprio sistema descrito. Este é definido por Lenton e van Oijen (2002) como

um sistema termodinamicamente aberto na superfície da Terra, compreendendo a vida (a biota), a atmosfera, a hidrosfera (oceano, geleiras e água doce), matéria orgânica morta, os solos, sedimentos e aquela parte da litosfera (crosta) que interage com os processos de superfície (incluindo rochas sedimentares e rochas sujeitas a intemperismo). (Lenton & van Oijen, 2002, p. 684).

Assumimos neste trabalho a definição de Lenton & van Oijen. Nesta definição, Gaia é um subsistema da Terra, na medida em que não inclui as camadas mais interiores do planeta e surge apenas quando a vida se torna abundante, pois só após se dispersarem pelo planeta, as populações podem afetar significativamente variáveis físico-químicas, como composição atmosférica (ver Lenton & van Oijen, 2002, p. 684). Esta pode ser apontada, inclusive, como uma razão para sustentar que o programa Gaia e a Ciência do Sistema Terrestre, são duas empreitadas intelectuais distintas, ainda que a última tenha se beneficiado de idéias proporcionadas pelo primeiro (para maiores detalhes sobre este ponto ver capítulo 1 desta dissertação).

A partir da apresentação do programa de pesquisa, passemos agora a discutir algumas questões gerais acerca da inserção de Gaia na educação científica.

3. Aspectos gerais sobre a inserção de Gaia no ensino de ciências

3.1. Transposição didática de Gaia

A construção do conhecimento escolar de ciências é, de fato, mais complexa do que pode parecer à primeira vista. Ela envolve o difícil processo de transposição didática, no qual diversos atores sociais, com suas respectivas visões de mundo, conhecimentos, valores etc, desempenham papéis importantes. A noção de transposição didática foi proposta pela primeira vez por Michell Verret em 1975, porém difundiu-se a partir das publicações de Yves Chevallard (1991). No começo, a noção estava restrita apenas à área de educação matemática, contudo, posteriormente repercutiu também na didática de outras disciplinas.

Ao longo do processo de transposição didática, o conhecimento é inevitavelmente transformado. Porém, Chevallard (1991) ressalta que, apesar das transformações ocorridas em tal processo, o conhecimento escolar deve ser suficientemente próximo do conhecimento de referência, para que não seja desautorizado pelos cientistas envolvidos na produção deste último, o que minaria a legitimidade do projeto social de seu ensino. Chevallard aponta, por um lado, a importância do princípio da vigilância epistemológica, que deve ser exercida pelos atores da transposição, de modo a garantir que o conhecimento escolar não se distancie demasiadamente do conhecimento de referência. Por outro lado, também não se pode perder de vista que se o conhecimento escolar permanecer próximo demais do conhecimento de referência, ele não será ensinável, em vista das dificuldades de ensinar e de aprender o conhecimento acadêmico pouco transformado. Assim, existe sempre um conflito entre os atores da transposição didática, na medida em que a comunidade científica se esforça, em diversos graus, para diminuir a distância entre os conhecimentos escolar e de referência, enquanto autores e editores de livros didáticos, assim como professores, tendem a aumentar tal distância, para que se torne mais exequível o ensino e mais provável a aprendizagem do conteúdo em questão. Para Chevallard (1991, p. 16), a vigilância epistemológica tem também o papel de evitar a introdução no conhecimento escolar, de conhecimentos pseudocientíficos.

A inserção de idéias ligadas a Gaia pode contribuir indiretamente para introduzir no conhecimento escolar, idéias que são estranhas ao conhecimento científico. Por exemplo, Lovelock vem afirmando desde as primeiras apresentações do seu programa de pesquisa, que o sistema Gaia é um organismo vivo. Normalmente ele apóia esta tese controversa em

analogias supostamente existentes entre a Terra e os organismos vivos⁸⁹. Em seu último livro, *A vingança de Gaia*, Lovelock afirma:

A essa altura, meus amigos e colegas farão uma cara feia e desejarão que eu pare de falar de nosso planeta como uma forma de vida. Entendo a preocupação deles, mas permaneço irredutível: se de início eu não tivesse concebido a Terra dessa maneira, poderíamos todos ter permanecido ‘cientificamente corretos’, mas sem a compreensão de sua verdadeira natureza. (Lovelock, 2006, p. 16)

Precisamos apontar que, do nosso ponto de vista, os avanços para o entendimento do sistema Terra que o programa Gaia nos proporciona não se apóiam em posições cientificamente incompatíveis com as premissas metafísicas da ciência contemporânea, como a proposição de que a Terra é um organismo. Deste modo, nos parece que Lovelock se equivoca ao pensar que foi necessário assumir uma postura cientificamente incorreta, para aumentarmos nosso entendimento sobre o planeta, como sua afirmação sugere.

Do nosso ponto de vista, as afirmações controversas de Lovelock de que a Terra ou o sistema Gaia é um organismo vivo, não devem ser reconhecidas como parte essencial do programa de pesquisa (Carmo et al, 2007, no prelo; Lima-Tavares & El-Hani, 2001; Guimarães et al, no prelo). Ao invés destas idéias, defendemos que a ênfase seja dirigida para as propostas de que os seres vivos e o ambiente físico-químico estão interligados através de alças de retroalimentação, constituindo um grande sistema cibernético de controle em escala planetária. Esta proposta nos parece muito mais rica em termos heurísticos, assim como evita controvérsias metafísicas desnecessárias. A assunção desta perspectiva sobre a vida na Terra levou inclusive, à criação de toda uma nova área de pesquisas, conhecida como Conexão algas-nuvens (conforme Nunes Neto et al, 2008; ver também capítulo 1 desta dissertação).

Neste sentido, é importante transpor Gaia para o conhecimento escolar, porque ela pode contribuir para integrar diversos campos do conhecimento científico que são normalmente apresentados de modo fragmentado aos estudantes. Assim, conteúdos da biologia, física, química, geologia, assim como assuntos concernentes às relações entre a sociedade e o ambiente do qual ela é parte, podem ser integrados numa abordagem interdisciplinar.

Contudo, a transposição didática do programa Gaia deve ser feita com os devidos cuidados, pois trata-se de um programa de pesquisa com implicações que transcendem as fronteiras científicas, perpassando discussões de outras esferas, como a política, por exemplo (Markoš, 1995). Além disso, Gaia atraiu na década de 1960 e ao longo da década de 1970, grupos espiritualistas vinculados ao pensamento da Nova Era, sobretudo devido a algumas afirmações polêmicas de Lovelock, como as que atribuem vida ou senciência à Terra (para maiores detalhes ver capítulo 1 desta dissertação). Devemos evitar, portanto, que conteúdos estranhos ao ensino de ciências sejam transmitidos aos alunos, seja através do discurso dos professores, seja através dos livros didáticos.

⁸⁹ Para maiores detalhes ver capítulo 1 desta dissertação (ver também Carmo et al, 2007, no prelo.)

3.2. Contribuições de Gaia para um ensino de ciências contextualizado histórica e filosoficamente

Além dos aspectos discutidos acima, julgamos importante salientar que a transposição didática de Gaia não pode estar desvinculada de uma abordagem contextual do ensino de ciências. Tal abordagem consiste em considerar o ensino de ciências contextualizado por questões históricas e filosóficas, as quais se ligam à produção do conhecimento científico. Neste sentido, não se trata apenas de oferecer aos estudantes um ensino *de* ciências, ou seja, de conteúdos científicos, mas também um ensino *sobre* as ciências (Matthews, 1995). Em outras palavras, trata-se de evitar a mera reprodução de conhecimento científico, como se este tivesse sido construído fora de qualquer contexto histórico-social, ou, como dizia Schwab (1964), devemos evitar a “retórica de conclusões” no ensino de ciências. Em vez disso, uma abordagem contextual do ensino de ciências deve enfatizar, entre outras coisas, que teorias científicas são entidades históricas em constante mudança e que são construídas num contexto social complexo. Reconhecer estes fatos significa apoiar o ensino de ciências seriamente na história das ciências e na filosofia da ciência.

Gaia pode ser uma interessante via de inserção de conteúdos de história e filosofia da ciência no ensino de ciências, como bem notou Gail Baker (1993):

Um estudo da hipótese Gaia num curso de biologia ilustra para os estudantes o desenvolvimento de uma hipótese científica atual e a integração criativa entre diferentes aspectos da biologia e entre a biologia e outras disciplinas que frequentemente resulta no desenvolvimento de hipóteses novas e originais. (Baker 1993, p. 115).

Nesta linha de raciocínio, Baker (1993) argumentou que o estudo de um programa de pesquisa controverso como Gaia contribui para uma compreensão do processo de produção do conhecimento científico. Por isso, o programa Gaia deve ser tratado, seja nas aulas, seja nos livros didáticos de ciências, desta perspectiva contextualizada.

As proposições controversas de Lovelock, como a de que a Terra é viva, assim como o uso reiterado de expressões metafóricas, para se referir a Gaia suscitam questões importantes sobre a natureza da ciência e a demarcação entre o conhecimento científico e outras formas de conhecimento. Sobre o uso extensivo de expressões metafóricas, James Kirchner, um importante crítico do programa de pesquisa, afirmou:

A percepção comum é a de que Gaia significa que ‘a Terra é viva’ ou que a biosfera está tentando fazer uma boa casa para si própria aqui. Porque muitas pessoas não compreendem os riscos de tratar afirmações poéticas como proposições científicas, o público em geral pensa que os cientistas estão ocupados tentando compreender se a Terra *realmente* é ‘viva’. (Kirchner, 1993, p. 46, ênfase no original).

O comentário de Kirchner mostra ainda o risco de diluição das fronteiras entre um discurso científico e outros tipos de discurso que tais declarações controversas de Lovelock suscitam. Estas questões podem ser discutidas com proveito no contexto escolar.

Precisamos apontar também para a importância da historicidade na exposição de uma teoria científica ou programa de pesquisa, no contexto escolar. A inserção de Gaia, como também de muitos outros construtos intelectuais, no ensino de ciências não pode ser feita de modo adequado sem levar em conta que o grau de aceitação de Gaia pela comunidade científica mudou significativamente ao longo do tempo, desde seu surgimento (cf. discutimos no capítulo 1). De acordo com Lenton (2004)

Freqüentemente tem me chocado que muitos dos críticos de Gaia compreendem mal o que está sendo proposto, em parte por que o que está sendo proposto tem sido refinado ao longo do tempo. Os ataques tem sido freqüentemente lançados às bases de versões antigas da hipótese Gaia, as quais o seu criador e os apoiadores, já abandonaram a muito tempo. (Lenton, 2004, p. 15)

Assim, muitas críticas feitas contemporaneamente ao programa Gaia somente podem ser dirigidas, na verdade, às primeiras versões do programa, das décadas de 1960 e 1970. Elas dirigem-se contra um objeto do passado, que já foi transformado, porém tem o intuito de invalidar o programa de pesquisa na sua forma atual. Em suma, como tais críticas perdem de vista o aspecto de historicidade inerente à construção do conhecimento científico, elas simplesmente são inaplicáveis a Gaia.

3.3. Gaia frente às questões ambientais contemporâneas

O programa de pesquisa iniciado por Lovelock, como já apontamos, oferece uma importante contribuição para o tratamento de questões ambientais contemporâneas, como as mudanças climáticas. Gaia oferece uma visão sistêmica, de maior alcance, sobre a vida na Terra, relativamente a abordagens mais tradicionais em ciências como a ecologia, que tendem a considerar níveis inferiores como foco de seus estudos. Esta estratégia sistêmica não pode ser dispensada na atualidade, diante da atual crise ecológica, na medida em que fenômenos como as mudanças climáticas não são processos localizados espacialmente, mas são, antes, de alcance global.

Além disso, Gaia propõe, uma mudança na nossa concepção dos processos envolvidos na dinâmica planetária, com relação à geologia tradicional, ao enfatizar o papel dos seres vivos na transformação e remodelação do ambiente físico-químico. Nesse sentido, na medida em que muitos componentes do sistema Terra existem por conta de processos biológicos, Gaia nos oferece uma boa razão para a integração entre as diversas ciências naturais que se dedicam ao estudo da Terra e dos seres vivos.

Porém há uma limitação importante de Gaia para o tratamento de questões ambientais, seja no ensino de ciências ou entre o público em geral. Gaia oferece uma abordagem do mundo focada essencialmente sobre os aspectos naturais das relações entre

seres vivos e ambiente físico-químico. Assim, ela acaba por deixar de lado, ou ao menos não abordar com grande profundidade as relações entre as sociedades humanas e o ambiente natural. É importante ressaltar que não se trata de um falha do programa Gaia, que mina sua legitimidade. Apenas apontamos que este não é o seu foco.

A crise ambiental contemporânea tem uma dimensão política, que está relacionada a aspectos naturais, mas de algum modo, os transcendem. Assim, para dar conta adequadamente de questões ambientais precisamos oferecer uma abordagem histórica e social. Por exemplo, suponha que gostaríamos de obter uma resposta para a seguinte pergunta, de grande relevância ambiental: “porque ocorre a liberação de gases do efeito estufa, os quais são responsáveis, em grande medida, pela mudança climática em curso?”. Podemos abordar a questão da liberação de gases do efeito estufa em termos puramente científicos. Podemos oferecer uma explicação científica, recorrendo aos conhecimentos de física, química, geologia e biologia, necessários para compreender todo o processo natural que vai da liberação dos gases ao seu efeito sobre a atmosfera do planeta, e em última instância sobre os seres vivos em geral, ou as sociedades humanas em particular. Como apontamos acima, Gaia oferece, inclusive, uma abordagem mais integradora diante de tais abordagens mais tradicionais.

Porém, mesmo com uma abordagem integradora deste tipo, permanecemos nos limites de uma abordagem em termos de ciências naturais. Assim, mesmo que explorássemos de modo exaustivo todo o conhecimento científico a fim de explicar o fenômeno, a questão continua a intrigar-nos. Isto ocorre por que abordagens em termos *apenas* das ciências naturais não podem dar conta adequadamente das relações históricas e sociais que desempenham papel extremamente relevante na geração de problemas ambientais.

Isto significa que, do debate sobre as mudanças climáticas não podemos deixar de levar seriamente em consideração os aspectos sociais e políticos da questão. Tratar a questão apenas como uma questão técnica pode levar a propostas tecnicistas, como alguns mecanismos de engenharia climática. Por exemplo, Lovelock e Rapley (2007) propuseram em carta à *Nature*, um mecanismo de engenharia climática visando mitigar os efeitos do aquecimento global. Este mecanismo está fundamentado na contribuição das algas para a liberação de DMS e para a captura de CO₂ atmosférico. Os autores propõem a instalação nos oceanos de tubos ou canos verticais, flutuantes ou amarrados, com o objetivo de “aumentar a mistura de águas ricas em nutrientes abaixo da termoclina⁹⁰ com as águas relativamente estéreis da superfície oceânica” (Lovelock & Rapley, 2007, p. 403). Estes canos deveriam ter de 100 a 200 metros de comprimento e 10 metros de diâmetro e bombeariam água do fundo para a superfície, fornecendo, assim, nutrientes para as algas acima da termoclina. Esta oferta extra de nutrientes aumentaria a taxa de crescimento das algas e, em conseqüência, a taxa fotossintética, a qual está relacionada à taxa de captura de CO₂ da atmosfera. Além disso, as algas aumentariam sua emissão de DMS, o que, em última instância, resfriaria o planeta, devido à sua contribuição para a formação de nuvens.

Lovelock & Rapley, na proposta de engenharia climática, estão voltados apenas para questões técnicas da questão, mas os aspectos políticos são determinantes cruciais da atual crise ambiental no planeta. Por exemplo, o modo como certos países enriqueceram ao longo da história às custas da pilhagem dos recursos naturais coletivos ou da degradação ambiental é um ponto central deste debate. Em suma, a uma questão com viés fortemente

⁹⁰ Trata-se da região de transição de temperatura entre a superfície oceânica e o oceano profundo.

ideológico, como a questão ambiental, não podemos esperar uma solução meramente técnica⁹¹.

A partir do exposto, retornemos ao nosso exemplo. Para abordar adequadamente a questão que colocamos acima, precisaríamos olhar, *grosso modo*, para as relações sociais e políticas das sociedades modernas e como elas se constituíram ao longo da história. Em termos mais específicos, seria de grande relevância, focar nossa atenção sobre a revolução industrial do final do século XVIII, na Inglaterra e o uso maciço de carvão para gerar energia. Ao longo do século XX este processo só se intensificou, sobretudo com o fordismo.

Aqui, não temos a pretensão de construir uma explicação em termos sociais e históricos, até porque este não é o foco do nosso trabalho. Apenas desejamos apontar para o que vemos como um importante aspecto da resposta à questão colocada acima, de “porque ocorre a liberação de gases do efeito estufa...?”. Uma resposta adequada à pergunta deve fazer referência a fatores sociais e históricos, os quais geralmente não estão presentes nas abordagens tecnicistas do mundo.

É importante ressaltar que isto não é nenhum demérito das ciências naturais frente às humanidades, mas antes, reflete o fato de que elas são empreitadas humanas distintas, com diferentes perspectivas sobre o mundo. Note-se ainda que do fato de serem empreitadas distintas não segue que elas devam excluir-se mutuamente. Ao invés disso, elas devem ser complementares. Estamos convencidos de que uma abordagem unilateral da questão ambiental está fadada ao fracasso. A compreensão da crise ambiental contemporânea deve ser alcançada, assim, a partir das contribuições das ciências naturais e das humanidades. E isto leva-nos ao ponto seguinte.

Pelo exposto, nos parece razoável a tese de que precisamos, além de uma abordagem em termos de ciências naturais, também de uma abordagem que dê conta adequadamente dos aspectos sociais e políticos das questões ambientais. Assim, no âmbito do ensino, temos uma forte razão para insistir na idéia da transversalidade com relação ao tema meio ambiente. Meio ambiente precisa ser tratado seriamente como uma questão transversal, em todos os níveis de ensino, nas diversas disciplinas. Não é suficiente tratá-lo apenas como um tema em biologia ou geografia, ou mesmo tratá-lo como uma “disciplina” isolada. No ensino médio, por exemplo, em diversas disciplinas, há oportunidades muito adequadas para a discussão de questões ambientais. Em graus variados todas as disciplinas podem, e devem, tratar das questões ambientais, porém algumas, podem fazê-lo de modo mais profundo, como biologia, química, física, geografia e história.

Como dissemos antes, Gaia não é suficiente para dar conta de modo completo das questões ambientais contemporâneas. Porém isto não significa que ela não seja necessária. A visão sistêmica oferecida por Gaia, e incorporada hoje à Ciência do Sistema Terrestre, é imprescindível, diante dos desafios globais que enfrentamos. O que defendemos é que as contribuições de Gaia precisam ser matizadas e consideradas ao lado das contribuições das humanidades, para um tratamento integral das questões ambientais contemporâneas. De

⁹¹ Um belo exemplo fictício de como problemas ideológicos resistem a soluções que inflacionam o papel da técnica, está em Não Verás País Nenhum, de Ignácio de Loyola Brandão (Brandão, 1982). Esta obra evidencia muito bem, ainda, o fato de que frequentemente as elites fazem parecer que os problemas coletivos são superáveis tão somente a partir de inovações técnicas. Deste modo, se apenas a técnica pode resolver os problemas, não há porque alterar o *status quo* social e político, o que afinal é algo indesejável para os que pretendem se manter no poder.

algum modo, este é o desafio que está colocado para a Ciência do Sistema Terrestre⁹² e estende-se também a outros ramos do conhecimento humano, para além da ciência.

4. Considerações finais

Atualmente, Gaia é um programa de pesquisa que não pode ser deixado de lado em discussões acerca do funcionamento do sistema Terra e outros assuntos de extrema importância no ensino de ciências, como ciclos biogeoquímicos e mudanças climáticas.

No entanto, no processo de inserção de Gaia no ensino de ciências, é preciso dar conta de questões relativas à sua transposição didática, sobretudo se quisermos evitar a reprodução no ensino de ciências, de conteúdos estranhos à ciência. Para isso, precisamos voltar nossa atenção para a noção de vigilância epistemológica de Chevallard (1991). Devemos evitar a transmissão das idéias cientificamente controversas de Lovelock como as que propõe que a Terra é um organismo vivo, e deslocar a ênfase para a contribuição que consideramos mais original e interessante do programa Gaia: a tese de que os organismos e o ambiente físico-químico estão interligados através de alças de retroalimentação negativas e positivas constituindo ao nível planetário, um sistema cibernético de controle.

A inserção de temas de história e filosofia das ciências através de discussões sobre o programa Gaia pode contribuir duplamente para a formação dos alunos (Baker, 1993). De um lado, eles terão, por exemplo, uma compreensão da natureza da ciência e do papel da controvérsia na comunidade científica. De outro lado, os alunos terão a oportunidade de desenvolver uma visão crítica quanto ao programa Gaia em particular, na medida em que uma apresentação dele embasada histórica e filosoficamente se distancia da opinião mais difundida entre o público em geral.

Além de benefícios que podem advir da inserção de Gaia no ensino de ciências, apontamos também para uma limitação desta, para o tratamento de questões ambientais. Na medida em que é uma abordagem construída no âmbito das ciências naturais, Gaia não aborda com suficiente profundidade as relações sociais e políticas que se estabeleceram ao longo da história humana. Isto consiste numa limitação do programa Gaia para tratar de questões ambientais. Porém, trata-se de uma limitação que aponta para a necessidade de um tratamento transversal do tema meio ambiente, perpassando diversas disciplinas do currículo escolar. Acreditamos que a visão sistêmica oferecida por Gaia, para dar conta das relações entre os seres vivos e ambiente físico-químico, é indispensável diante dos desafios que temos pela frente, enquanto humanidade. Contudo, esta perspectiva pode ser enriquecida se a ela for agregada a dimensão social e política das questões ambientais contemporâneas. Reconhecer as limitações de uma perspectiva teórica, ao invés de ser prejudicial, pode contribuir positivamente para o ensino, e está de acordo, com a própria atitude crítica diante do conhecimento, que apoiamos neste trabalho.

Agradecimentos

⁹² Para maiores detalhes sobre esta nova ciência, ver o capítulo 1 desta dissertação (ver também, Wilkinson, 2006; Jacobson *et al.*, 2000; Kump *et al.*, 1999).

N.F.N.N. agradece ao CNPq, pela bolsa de mestrado concedida durante a realização deste trabalho e à FAPESB por financiamento de projeto de pesquisa. C.N.E.H. agradece ao CNPq por bolsas de produtividade em pesquisa e pós-doutorado, e à FAPESB e ao CNPQ por financiamentos de projetos de pesquisa.

Referências

Atreya, S.K.; Mahaffy, P.R.; Wong, A.-S. Methane and related trace species on Mars: Origin, loss, implication for life and habitability. **Planetary and Space Science**, v. 55, n. 3, p. 358-369, 2007.

Baker, G.A. Using the Gaia hypothesis to synthesize an introductory biology course. **The American Biology Teacher**, v. 55, p. 115-116, 1993.

Brandão, I.L. **Não Verás País Nenhum**. São Paulo: Círculo do Livro, 1982.

Carmo, R.S.; Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia theory in Brazilian High School Biology textbooks. **Anais da International Organisation for Science and Technology Education (IOSTE)**, 2007, Hammamet (Tunisia). Hammamet: IOSTE, 2007. p.365-379. 2007.

Carmo, R.S.; Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia Theory in Brazilian High School Biology Textbooks. **Science & Education** (Dordrecht), no prelo.

Charlson, R.J.; Lovelock, J.E.; Andreae, M.O.; Warren, S.G. Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate. **Nature**, v. 326, n° 6114, pp. 655-661, abril, 1987.

Chevallard, Y. **La Transposición Didáctica: Del Saber Sabio al Saber Enseñado**. Buenos Aires: Aique, 1991.

Guimarães, M.D. **A teoria Gaia no Ensino de Biologia: Revisão crítica de literatura e proposta de seqüência de ensino para sua inclusão no ensino médio**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2007.

Guimarães, M.D.; Lima-Tavares, M.; Nunes Neto, N.F.; Carmo, R.S.; El-Hani, C.N. A teoria Gaia deve ser ensinada? **Pesquisa em Educação Ambiental**, no prelo.

Hamilton, W.D. & Lenton, T.M. Spora and Gaia: how microbes fly with their clouds. **Ethology, Ecology & Evolution**, v. 10, n. 1, p. 1-16, 1998.

Hitchcock, D.R. & Lovelock, J.E. Life detection by atmospheric analysis. **Icarus**, v. 7, n. 2, p. 149-159, 1967.

IPCC, 2007: **Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M.; Miller, H.L. (Eds.). Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: 20 out. 2007.

Jacobson, M.C.; Charlson, R.J.; Rodhe, H.; Orians, G.H. **Earth System Science: From Biogeochemical Cycles to Global Changes**, Elsevier: San Diego, CA, 2000.

Kirchner, J.W. The Gaia Hypothesis: Are they Testable? Are they Useful? in: Schneider, S.H. & Boston, P.J. **Scientists on Gaia**. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 38-46, 1993.

Kloster, S.; Feichter, J.; Maier-Reimer, E; Six, K.D.; Stier, P; Wetzel, P. DMS cycle in the marine ocean atmosphere system – a global model study. **Biogeosci Discuss.**, v. 2, p. 1067-1126, 2005.

Kump, L.R.; Kasting, J.F.; Crane, R.G. **The Earth System**. Prentice Hall: New Jersey, 1999.

Lakatos, I. Falsification and the methodology of scientific research programmes [1970]. Vol. 1, pp. 8-101. in: Worrall, J.; Currie, G. (eds). **The methodology of scientific research programmes**, Philosophical Papers, v. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 2 vols.

Lenton, T. M. Gaia and Natural Selection. **Nature**, v. 394, n° 6692, pp. 439-447, 1998.

Lenton, T.M. Clarifying Gaia: Regulation with or without Natural Selection. 2004. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. **Scientists Debate Gaia: The Next Century**. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Lenton, T. M. & van Oijen, M. Gaia as a complex adaptive system. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**. V. 357, pp. 683-695. 2002.

Lenton, T.M. & Lovelock, J.E. Daisyworld is darwinian: Constraints on adaptation are important for planetary self-regulation. **Journal of Theoretical Biology**, v. 206, p. 109-114, 2000.

Lenton, T.M. & Lovelock, J.E. Daisyworld revisited: Quantifying biological effects on planetary self-regulation. **Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology**, v. LIII, n. 3, p. 288-305, 2001.

Lima-Tavares, M. **Gaia e Ciência: Uma Análise da Cientificidade da teoria Gaia de acordo com a Metodologia dos Programas de Pesquisa de Lakatos**. Salvador: Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Dissertação de Mestrado, 2003.

- Lima-Tavares, M. & El-Hani, C.N. Um olhar epistemológico sobre a transposição didática da teoria Gaia. **Investigações em ensino de ciências**. v. 6, n° 3, dezembro, 2001.
- Lovelock, J.E. A physical basis for life detection experiments. **Nature**, v. 207, n. 7, 1965.
- Lovelock, J.E. Hands up for the Gaia hypothesis. **Nature**. v. 344, pp.100-102. 1990.
- Lovelock, J.E. **Gaia the Practical Science of Planetary Medicine**. Oxford: Oxford University Press. [1991]2000
- Lovelock, J.E. The living Earth. **Nature**, v. 426, p. 769-770, 2003.
- Lovelock, J.E. **A vingança de Gaia**. Tradução de Ivo Kirtovsky. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2006.
- Lovelock, J.E.; Lodge, J.P. Oxygen in the contemporary atmosphere. **Atmospheric Environment**, v. 6, p. 575-578, 1972.
- Lovelock, J.E.; Maggs, R.J.; Rasmussen, R.A. Atmospheric dimethyl sulphide and the natural sulphur cycle. **Nature**, v. 237, p. 452-453, 1972.
- Lovelock, J.E. & Margulis, L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. **Tellus** . v. 26. n° 1-2. pp. 2-10. 1974.
- Lovelock, J.E. & Rapley, C. Ocean pipes could help the Earth to cure itself. **Nature**. V. 449, n° 27, September. 2007.
- Margulis, L.; Lovelock, J.E. Biological modulation of the earth's atmosphere. **Icarus**, n. 21, p. 471-489, 1974.
- Markoš, A. The ontogeny of Gaia: The role of microorganisms in planetary information network. **Journal of Theoretical Biology**, 176, pp. 175-180, 1995.
- Matthews, M.R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.
- Nunes Neto, N.F.; Carmo, R.S.; El-Hani, C.N. Mudanças Climáticas e Conexão Algas-Nuvens. In: Seabra, G. **Conferência da Terra: Fórum Internacional de Meio Ambiente**. João Pessoa: UFPB, pp. 133-141, 2008.
- Rosenzweig, C.; Karoly, D.; Vicarelli, M.; Neofotis, P.; Wu, Q.; Casassa, G.; Menzel, A.; Root, T.L.; Estrella, N.; Seguin, B.; Tryjanowski, P.; Liu, C.; Rawlins, S.; & Imeson, A.. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. **Nature**, v. 453, pp. 353-358, 2008.
- Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. **Scientists Debate Gaia: The Next Century**. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Schwab, Joseph J. The structure of the natural sciences. In: G. W. Ford & L. Pugno (eds.). **The Structure of Knowledge and the Curriculum**. Chicago: Rand-McNally, 1964.

Simó, R. Production of atmospheric sulfur by ocean plankton: biogeochemical, ecological and evolutionary links. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 16, p. 287-294, 2001.

Tickell, C. Gaia and the Human Species. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. **Scientists Debate Gaia: The Next Century**. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Van Rijssel, M.; Gieskes, W. Temperature, light, and the Dimethylsulfoniopropionate (DMSP) content of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae). **Journal of Sea Research**, v. 48, n. 1, p. 17– 27, 2002.

Watson, A. & Lovelock, J.E. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. **Tellus, Series B – Chemical and Physical Meteorology**, v. XXXV, n. 4, p. 284-289, 1983.

Watson, A.J.; Lovelock, J.E.; Margulis, L. Methanogenesis, fires and the regulation of atmospheric oxygen. **Biosystems**, v. 10, p. 293-298, 1978.

Watson, A.J.; Lovelock, J.E.; Margulis, L. What controls atmospheric oxygen? **Biosystems**, v. 12, p. 123-125, 1980.

Wilkinson, D.M. **Fundamental Processes in Ecology: an Earth Systems approach**. Oxford: Oxford University Press, 2006.

REFERÊNCIAS

Abram, D. The Mechanical and the Organic: On the Impact of Metaphor in Science. In: Schneider, S.H. & Boston, P.J. *Scientists on Gaia*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 66-74, 1993.

Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press. 1998.

Almeida, A.M. *O papel funcional da diversidade biológica: uma análise da atribuição de função à biodiversidade na ecologia das últimas décadas*. Salvador: Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Dissertação de Mestrado, 2004.

Andreae, M.O.; Crutzen, P.J. Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, vol. 276, p. 1052-1058, 1997.

Andreae, M.O.; Rosenfeld, D.; Artaxo, P.; Costa, A.A.; Frank, G.P.; Longo, K.M.; Silva-Dias, M.A.F. Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science*, vol. 303, n. 27, pp. 1337-1342, 2004.

Andrew, A.M. Global warming and nuclear power. *Kybernetes*, vol. 36, n. 3/4, pp. 465-468, 2007.

Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, 2002.

Artaxo, P.; Gatti, L.V.; Leal, A.M.C; Longo, K.M.; Freitas, S.R.; Lara, L.L.; Pauliquevis, T.M.; Procópio, A.S.; Rizzo, L.V. Química atmosférica na Amazônia: A floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazônica*. Vol 35, n. 5, pp. 185-196, 2005.

Atreya, S.K.; Mahaffy, P.R.; Wong, A.-S. Methane and related trace species on Mars: Origin, loss, implication for life and habitability. *Planetary and Space Science*, vol. 55, n. 3, p. 358-369, 2007.

Ayers, G.P. & Cainey, J.M. The CLAW hypothesis: a review of the major developments. *Environmental Chemistry*, vol. 4, nº 6, 366–374, 2007.

Badiner, A.H. (Ed.). *Dharma Gaia: A harvest of essays in Buddhism and ecology*. Berkeley-CA: Parallax Press, 1990.

Bachelard, G. *A formação do espírito científico*. Rio de Janeiro: Contraponto. [1938]1996.

Baker, G.A. Using the Gaia hypothesis to synthesize an introductory biology course. *The American Biology Teacher*, vol. 55, p. 115-116, 1993.

Barlow, C. & Volk, T. Gaia and Evolutionary Biology. *BioScience*, vol 42, nº 9, pp. 686-693, 1992.

Bateson, W. *Materials for the Study of Variation*. New York: Macmillan, 1894.

Bechtel, W.; Richardson, R. *Discovering Complexity: Decomposition and Localization as Strategies in Scientific Research*. Princeton – NJ: Princeton University Press, 1993.

Beckner, M. Function and Teleology. *Journal of the History of Biology*, vol. 2, pp. 151-164, 1969.

Bigelow, J. & Pargetter, R.; Functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 241-259, [1987]1998.

Brandão, I.L. *Não Verás País Nenhum*. São Paulo: Círculo do Livro, 1982.

Brandon, R. Theory and experiment in evolutionary biology. *Synthese* 99, pp. 59-73, 1994.
Charlson, R.J.; Lovelock, J.E.; Andreae, M.O.; Warren, S.G. Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate. *Nature*, vol 326, nº 6114, pp. 655-661, abril, 1987.

Cainey, J.M. Investigating the current thinking on the CLAW Hypothesis. *Environmental Chemistry*, vol. 6, nº 4, p. 365, 2007.

Canfield, J. Teleological Explanations in Biology. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 14, n. 56, pp. 285-295, 1964.

Caponi, G. Biología Funcional vs. Biología Evolutiva. *Episteme*, n. 12, p. 23-46, 2001.

Caponi, G. Explicación seleccional e explicación funcional: la teleología en la biología contemporânea. *Episteme*, n. 14, pp. 57-88, 2002.

Caponi, G. Física del organismo vs hermenêutica del viviente: el alcance del programa reduccionista en la biología contemporânea. *História, Ciência, Saúde – Manguinhos*, vol. 14, nº 2, pp. 443-468, abr-jun, 2007.

Carmo, R.S.; Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia Theory in Brazilian High School Biology Textbooks. *Science & Education* (Dordrecht), no prelo.

Carmo, R.S.; Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia theory in Brazilian High School Biology textbooks. *Anais da International Organisation for Science and Technology Education (IOSTE)*, 2007, Hammamet (Tunisia). Hammamet: IOSTE, 2007. p.365-379.
2007

Carnap, R.; Morris, C.; Neurath, O. (eds.). *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. 1, Chicago: University of Chicago Press, 1955.

- Carrol, S. *Infinitas formas de grande beleza*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 2005.
- Chakoumakos, B. Preface to the *Clathrate Hydrates* special issue. *American Mineralogist*, vol. 89, pp. 1153-1154, 2004.
- Chalmers, A.F. *O Que é Ciência, Afinal?* Brasiliense, São Paulo, 1993.
- Charlson, R.J.; Lovelock, J.E.; Andreae, M.O.; Warren, S.G. Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate. *Nature*, vol 326, n° 6114, pp. 655-661, abril, 1987.
- Charlson, R.J.; Seinfeld, J.H.; Nenês, A.; Kulmala, M.; Laaksonen, A.; Facchini, M.C.; Reshaping the Theory of Cloud Formation. *Science*, vol. 292, n. 5524, pp. 2025-2026, 2001.
- Chediak, K. Análise do conceito de função a partir da interpretação histórica. In: Prestes, M.E.; Martins, L.A.C.P.; Stefano, W. (eds). *Filosofia e História da Biologia I. Seleção de Trabalhos do IV Encontro de Filosofia e História da Biologia*. São Paulo. Fundo Mackenzie de Pesquisa. MackPesquisa. Pp. 161-174. 2006.
- Chevallard, Y. *La Transposición Didáctica: Del Saber Sabio al Saber Enseñado*. Buenos Aires: Aique, 1991.
- Christner, B.C.; Morris, C.E.; Foreman, C.M.; Cai, R.; Sands, D.C. Ubiquity of Biological Ice Nucleators in Snowfall. *Science*, vol. 319, p. 1214, 2008.
- Craver, C. & Bechtel, W.. Mechanism, in: S. Sarkar & J. Pfeifer (eds.), *Philosophy of science: an encyclopedia*. New York: Routledge, pp. 469-478, 2006.
- Cummins, R. Functional Analysis. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 169-196, [1975]1998.
- Cummins, R. *The Nature of the Psychological Explanation*. Cambridge, MA: MIT Press, 1983.
- Cummins, R. Neo-teleology. In: Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, pp. 157-172, 2002.
Disponível em <https://netfiles.uiuc.edu/rcummins/www/HomePage/Cummins.html>.
Acesso em: 16 mar. 2006.
- Darwin, C. *A Origem das Espécies*. Belo Horizonte: Itatiaia, 4ª edição, [1859]2002.
- Dawkins, R.. *The Extended Phenotype*. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- Dawkins, R. *O gene egoísta*. Companhia das Letras, [1976]2007.

Dennett, D.C. *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*. New York – NY: Simon & Schuster. 1995.

De Rosnay, J. History of Cybernetics and Systems Science. in: F. Heylighen, C. Joslyn and V. Turchin (eds): *Principia Cybernetica Web* (Principia Cybernetica, Brussels), URL: <http://pespmc1.vub.ac.be/CYBSHIST.html>. 2000.

Dick, S. & Strick, J. 2005. *The Living Universe: NASA and the Development of Astrobiology*. Piscataway, New Jersey: The State University of New Jersey. 2005.

El-Hani, C.N. & Queiroz, A.J. Modos de irreducibilidade das propriedades emergentes. *Scientiae studia*, vol. 3, n. 1, pp. 9-41, 2005.

Ezzel, E.C. & Ezzel, L.N. *On Mars: Exploration of the Red Planet. 1958-1978*. <http://history.nasa.gov/SP-4212/contents.html>. Acessado em 26 de janeiro de 2008. 1984.

Feest, U. Functional Analysis and the Autonomy of Psychology. *Philosophy of Science*, 70, pp. 937-948, 2003.

Ferreira, M.A. A teleologia na biologia contemporânea. *Scientia Studia*. Vol. 1, n. 2. pp. 183-193. 2003.

Feyerabend, P. *Contra o Método*. Rio de Janeiro: Francisco Alves Editora, cap. 17, pp. 347-445, [1975]1977.

Free, A. & Barton, N. Do evolution and ecology need the Gaia hypothesis? *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 22, n. 11, pp. 611-619, 2007.

Gabric, A.; Gregg, W.; Najjar, R.G.; Erickson, D. J. III; & Matrai, P. Modeling the Biogeochemical Cycle of Dymethylsulfide in the Upper Ocean: a Review. *Chemosphere – Global Change Science*, vol 3, nº 4, pp. 377-392, 2001.

Godfrey-Smith, P. Functions: Consensus without unity. *Pacific Philosophical Quarterly*, 74, pp. 196-208, 1993.

Godfrey-Smith, P. A Modern History Theory of Functions, In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 453-477, [1994]1998.

Gould, S.J.. *The Structure of Evolutionary Theory*. Cambridge-MA: Harvard University Press, 2002.

Gould, S.J. & Lewontin, R.C. The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. In: Sober, Elliott. *Conceptual Issues in Evolutionary Biology*, pp. 73-90 [1978]1994.

Gould, S.J. & Vrba, E. Exaptation: a missing term in the science of form. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 519-540, [1982]1998.

Gould, S.J. & Eldredge, N.. Punctuated Equilibria: The Tempo and Mode of Evolution Reconsidered. *Paleobiology*, Vol. 3, No. 2, pp. 115-151, 1977.

Gray, J. *Cachorros de Palha: reflexões sobre humanos e outros animais*. Rio de Janeiro: Record, 2007.

Griffiths, P. Functional analysis and proper functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 435-452, [1993]1998.

Guimarães, M.D. *A teoria Gaia no Ensino de Biologia: Revisão crítica de literatura e proposta de seqüência de ensino para sua inclusão no ensino médio*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2007.

Guimarães, M.D.; Lima-Tavares, M.; Nunes Neto, N.F.; Carmo, R.S.; El-Hani, C.N. A teoria Gaia deve ser ensinada? *Pesquisa em Educação Ambiental*. 2007

Hamilton, W.D. & Lenton, T.M. Spora and Gaia: How Microbes Fly with Their Clouds. *Ethology, Ecology & Evolution*, vol. 10, nº 1, pp. 1-16, 1998.

Hempel, C. & Oppenheim, P. Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science*, vol. 15, nº 2, pp. 135-175, april, 1948.

Hesíodo. *Teogonia*. São Paulo: Iluminuras. 2006.

Hitchcock, D. & Lovelock, J.E. Life Detection by Atmospheric Analysis. *Icarus*. 1967

Hobsbawm, E. *Era dos Extremos: o breve século XX – 1914-1991*. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

Hull, D. Teleologia, in: *Filosofia da Ciência Biológica*. Rio de Janeiro: Zahar, 1975.

Hull, D. Recent Philosophy of Biology: A review. *Acta Biotheoretica*, vol. 50, nº 2, pp. 117-128, jun, 2002.

IPCC, 2007: *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Disponível em www.ipcc.ch. Acessado em 20 de outubro de 2007.

Jablonka, E. Information: Its Interpretation, Its inheritance, and Its sharing. *Philosophy of Science*, 69, pp. 578-605. 2002.

Jacob, F. *A Lógica da Vida: uma história da hereditariedade*. Trad. Ângela Loureiro de Souza. Rio de Janeiro: Graal. [1970]1983.

Jacobson, M.C. Charlson, R.J.; Rodhe, H.; Orians, G.H. *Earth System Science: From Biogeochemical Cycles to Global Changes*. 2000

Johansson, I. The Constituent Function Analysis of Functions. Versão pré-impressa de artigo publicado em H.J. Koskinen et al. (eds), *Science – A Challenge to Philosophy?* pp. 35-45, 2006.

Johnson, D.R.; Ruzek, M.; Kalb, M. What is Earth System Science? *Proceedings of the 1997 International Geoscience and Remote Sensing Symposium Singapore*, pp. 688-691, 1997.

Jones, G. & Gabric, A. Sulphur aerosols released from melting sea ice may influence Antarctic climate. *Australian Antarctic Magazine*, n. 10, pp. 28-29, 2006.

Jones, A. & Roberts, D.L. An Interactive DMS Emissions Scheme for the Unified Model. Hadley Centre technical note 47. Exeter-UK: *Hadley Centre - Met Office*. February, 2004.

Kirchner, J.W. The Gaia hypothesis: Can it be tested? *Reviews of Geophysics*, vol. 27, nº 2, pp. 223-235, 1989.

Kirchner, J.W. Gaia: metaphor unfalsifiable. *Nature*, vol. 345, p. 470, 1990.

Kirchner, J.W. The Gaia Hypothesis: Are they Testable? Are they Useful? in: Schneider, S.H. & Boston, P.J. *Scientists on Gaia*. Cambridge-MA: MIT Press, pp. 38-46, 1993.

Kirchner, J.W. The Gaia hypothesis: fact, theory and wishful thinking. *Climatic Change*, 52, pp. 391-408, 2002.

Kirchner, J.W. The Gaia Hypothesis: Conjectures and Refutations. *Climatic Change*, 58. pp. 21-45, 2003.

Kirst, G.O. Osmotic adjustment in phytoplankton and macroalgae: the use of dimethylsulfoniopropionate (DMSP). In: Kiene, R.P.; Visscher, P.T.; Keller, M.D.; Kirst, G.O. (Eds.). *Biological and Environmental Chemistry of DMSP and Related Sulfonium Compounds*, Plenum Press: New York, pp. 121–129, 1996.

Kitcher, P. Function and Design in: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 479-503, [1993] 1998.

Kroll, G. *Rachel Carson Silent Spring: A Brief History of Ecology as a Subversive Subject*. Online Ethics Center for Engineering. Disponível em:

<http://onlineethics.org/CMS/profpractice/exempindex/carsonindex/kroll.aspx>. Acessado em 25 de janeiro de 2008. 2006.

Kleidon, A. Testing the Effect of Life on Earth's Functioning: How Gaian is the Earth System? *Climatic Change*. Vol. 52, pp. 383-389, 2002.

Kloster, S.; Feichter, J.; Maier-Reimer, E.; Six, K.D.; Stier, P.; Wetzzel, P. 'DMS Cycle in the Marine Ocean-atmosphere System – A Global Model Study', *Biogeosciences*, vol. 3, pp. 29-51, 2006.

Kump, L.R.; Kasting, J.F.; Crane, R.G. *The Earth System*. Prentice Hall: New Jersey, 1999.

Kump, L.R. & Pollard, D. Amplification of Cretaceous Warmth by Biological Cloud Feedbacks. *Science*, vol. 320, p. 195, 2008.

Lakatos, I. *Falsification and the methodology of scientific research programmes* [1970]. Vol. 1, pp. 8-101. in: Worrall, J.; Currie, G. (eds). *The methodology of scientific research programmes, Philosophical Papers, vol. 1*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 2 vols.

Larvor, B.. *Lakatos: An Introduction*. London and New York: Routledge. 1998.

Laudan, L. Commentary: Science at the bar – Causes for concern, in: Curd, M. & Cover, J. A. *Philosophy of Science: The Central Issues*. New York: W. W. Norton & Co. pp. 48-53, [1982]1998.

Leff, E. *Racionalidade Ambiental: a reapropriação social da natureza*. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 2006.

Lenton, T.M. Gaia and Natural Selection. *Nature*, 394, nº 6692, pp. 439-447, 1998.

Lenton, T.M. Testing Gaia: The Effect of Life of Earth's Habitability and Regulation, *Climatic Change*, vol. 52, pp. 409–422, 2002.

Lenton, T.M. Clarifying Gaia: Regulation with or without Natural Selection. 2004. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Lenton, T.M. & Lovelock, J.E. Daisyworld is Darwinian: Constraints on Adaptation are Important for Planetary Self-regulation. *Journal of Theoretical Biology*, vol. 206, nº 1, pp. 109-114, 2000.

Lenton, T.M. & Lovelock, J.E. Daisyworld Revisited: Quantifying Biological Effects on Planetary Self-regulation. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, vol. LIII, nº 3, pp. 288-305, 2001.

Lenton, T.M. & van Oijen, M. Gaia as a complex adaptive system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*. Vol. 357, pp. 683-695, 2002.

Lenton, T.M. & Watson, A. Redfield revisited: 1. Regulation of nitrate, phosphate and oxygen in the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 14, n. 1, pp. 225-248, 2000

Levit, G.S & Krumbein, W.E. The biosphere-theory of V.I. Vernadsky and the Gaia-theory of James Lovelock: a comparative analysis of the two theories and traditions. *Journal of General Biology*, vol. 61, n. 2, pp. 133-144, 2000.

Lewontin, R. The Organism as the Subject and Object of Evolution. In: Levins, R. & Lewontin, R. *The Dialectical Biologist*. Cambridge-MA: Harvard University Press, pp. 85-106, 1985.

Lewontin, R. *A Tripla Hélice: gene, organismo e ambiente*. São Paulo: Companhia das Letras. 2002.

Lima-Tavares, M. *Gaia e Ciência: Uma Análise da Cientificidade da teoria Gaia de acordo com a Metodologia dos Programas de Pesquisa de Lakatos*. Salvador: Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências. Dissertação de Mestrado, 2003.

Lima-Tavares, M. & El-Hani, C.N. Um olhar epistemológico sobre a transposição didática da teoria Gaia. *Investigações em ensino de ciências*. vol. 6, n° 3, dezembro, 2001.

Liss, P. & Lovelock, J.E. Climate change: the effect of DMS emissions. *Environmental Chemistry*, vol. 6, n° 4, 377-378, 2007.

Lovelock, J.E. A Physical Basis for Life Detection Experiments, *Nature*, v. 207, n. 7, pp. 568-570, 1965.

Lovelock, J.E. Atmospheric Fluorine Compounds as Indicators of Air Movements. *Nature*, 230, p. 379, 1971a.

Lovelock, J.E. Air pollution and Climatic Change. *Atmospheric Environment*, jun., vol. 5, n. 6, pp. 403-411, 1971b.

Lovelock, J.E. Letter to the Editors – Gaia as seen through the atmosphere. *Atmospheric Environment*, vol. 6. pp. 579-580. 1972.

Lovelock, J.E. *Gaia: A new look at life on earth*. Oxford University Press, Oxford, [1979]2000.

Lovelock, J.E. The electron capture detector – a personal odyssey. *Chemtec*, september, pp. 531-537, 1981.

Lovelock, J.E. 'Are we Destabilising World Climate? The Lessons of Geophysiology', *Ecologist* 15, pp. 52-55, 1985.

Lovelock, J.E. 'Geophysiology: A New Look at Earth Science', *Bulletin of the American Meteorological Society* 67, 392-396, 1986.

Lovelock, J.E. *As Eras de Gaia: uma biografia da nossa Terra viva*. Rio de Janeiro: Campus, [1988]1995.

Lovelock, J.E. *The Ages of Gaia: a Biography of our living Earth*. New York: W.W. Norton & Company, Inc., 1988.

Lovelock, J.E. Hands up for the Gaia hypothesis. *Nature*, vol. 344, pp. 100-102, 1990.

Lovelock, J.E. Gaia um Modelo para a Dinâmica Planetária e Celular, in: Thompson, W. I. (Org.). *Gaia uma Teoria do Conhecimento*. São Paulo: Editora Gaia Ltda. pp. 77-90, [1990] 2000.

Lovelock, J.E. *Gaia: the Practical Science of Planetary Medicine*. Oxford: Oxford University Press, [1991]2000.

Lovelock, J.E. *Homage to Gaia – The Life of an independent scientist*. Oxford: Oxford University Press, 2001.

Lovelock, J.E. Commentary: Gaia and Emergence – a response to Kirchner and Volk. *Climatic Change* 57: 1-3, 2003.

Lovelock, J.E. Reflections on Gaia. Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, pp. 1-6, 2004.

Lovelock, J.E. *A vingança de Gaia*. Tradução de Ivo Kirtovsky. Intrínseca, Rio de Janeiro, 2006a.

Lovelock, J.E. James Lovelock: essays, lectures and other writings. *Personal website of James Lovelock*. www.jameslovelock.org. Consultado em 01/09/2007. 2006b

Lovelock, J.E. & Hitchcock, D. Detecting planetary life from Earth. *Science Journal*, april, 1967.

Lovelock, J.E. & Giffin, C.E. Planetary Atmospheres: Compositional and other Changes Associated with the Presence of Life. *Advances in the Astronautical Sciences*, 25, pp.179-193, 1969.

Lovelock, J.E; Maggs, R.J; Rasmussen, R.A. Atmospheric Dimethyl Sulphide and the Natural Sulphur Cycle. *Nature*. vol. 237. pp. 452-453. 1972.

Lovelock, J.E. & Margulis, L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis. *Tellus*. vol. 26. n° 1-2. pp. 2-10. 1974a.

Lovelock J.E. & Margulis L. Homeostatic tendencies of the Earth's atmosphere. *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. 5:93-103, 1974b.

Lovelock, J.E. & Rapley, C. Ocean pipes could help the Earth to cure itself. *Nature*. Vol. 449, n° 27, September, 2007.

Margulis, L. & Lovelock, J.E. Biological modulation of the atmosphere. *Icarus*. vol.21. pp. 471-489. 1974

Margulis, L. 'James Lovelock's Gaia', in P. Bunyard (ed.) *Gaia in Action: Science of the Living Earth*, Floris Books, Edinburgh, 1997.

Margulis, L. 2004. Gaia by any other name. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Markoš, A. The ontogeny of Gaia: The role of microorganisms in planetary information network. *Journal of Theoretical Biology*, 176, pp. 175-180, 1995.

Matthews, M.R. História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 12, n. 3, p. 164-214, 1995.

Maynard-Smith, J.; Burian, R.; Kauffman, S.; Alberch, P.; Campbell, J.; Goodwin, B.; Lande, R.; Raup, D.; Wolpert, L. Developmental Constraints and Evolution. *The Quarterly Review of Biology*, Vol. 60, n° 3, pp. 265-287, September, 1985.

Mayr, E. *Toward a New Philosophy of Biology: Observations of an Evolutionist*. Cambridge-MA: Harvard University Press, 1988.

Mayr, E. *Biologia, Ciência Única*. Companhia das Letras. 2005.

Meyer, D. & El-Hani, C.N. *Evolução: o Sentido da Biologia*. Editora UNESP, São Paulo, 2005.

Milikan, R. In Defense of Proper Functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 293-312, [1989]1998.

Mitchell, S. *Biological Complexity and Integrative Pluralism*. Cambridge University Press: Cambridge, 2003.

Molina, M.; Rowland, F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, pp. 810-812, 1974.

Monson, R.K. & Holland, E.A. Biospheric Trace Gas Fluxes and their Control over Tropospheric Chemistry. *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 32, pp. 547-76, 2001.

Moorcroft, P.R. 'How Close Are We to a Predictive Science of the Biosphere?', *Trends in Ecology and Evolution*, n. 21, pp. 400-407, 2006.

Moore III, B., Underdal, A., Lemke, P. & Loreau, M. *The Amsterdam Declaration on Global Change*. http://www.sciconf.igbp.kva.se/Amsterdam_Declaration.html. Acessado em 1º de janeiro de 2008. 2001.

Murray, J.W. The Oceans. In: Jacobson, M.C. Charlson, R.J.; Rodhe, H.; Orians, G.H. *Earth System Science: From Biogeochemical Cycles to Global Changes*, Oxford, UK: Elsevier. pp. 230-278, 2000.

Neander, K. Function as Selected Effects: The Conceptual Analyst's Defense. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 313-333, [1991]1998.

Nicholson, S. & Rosen, B. (orgs.). *A vida oculta de Gaia: A inteligência invisível da Terra*. Gaia, São Paulo, 1997.

Nunes Neto, N.F. *Explicações Teleológicas na Teoria Gaia*. 109f. Monografia (Bacharelado) – Instituto de Biologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Gaia, Teleologia e Função. *Episteme* (Brasil), vol. 11, n. 23, pp. 15-48, 2006.

Nunes Neto, N.F.; El-Hani, C.N. Teleologia na teoria Gaia. In: Martins, R.A.; Silva, C.C.; Ferreira, J.M.; Martins, L.A-C.P (eds.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul. Seleção de trabalhos do 5º Encontro*. Campinas: Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul (AFHIC), pp. 331-340, 2008.

Nunes Neto, N.F.; Carmo, R.S.; El-Hani, C.N. Mudanças Climáticas e Conexão Algas-Nuvens. In: Seabra, G. *Conferência da Terra: Fórum Internacional de Meio Ambiente*. João Pessoa: UFPB, pp. 133-141, 2008.

Odling-Smee, F.J.; Laland, K.N.; Feldman, M.W. *Niche Construction: The Neglected Process in Evolution*. Princeton: Princeton University Press. 2003.

O'Dowd, C.D.; Jimenez, J.L.; Bahreini, R.; Flagan, R.C.; Seinfeld, J.H.; Hämer, K.; Pirjola, L.; Kulmala, M.; Jennings, S.G.; & G. Hoffmann, T.. Marine Aerosol Formation from Biogenic Iodine Emissions. *Nature*, vol. 417, p. 632-636, 2002.

Odum, E. *Ecologia*. Rio de Janeiro: Guanabara. 1988.

Ostrom, J.H.. Archaeopteryx and the origin of flight. *Quarterly Review of Biology*, 29, pp. 27-47, 1974.

Ostrom, J.H.. Bird Flight: How did it begin? *American Scientist*, Vol. 67, pp. 46-56, 1979.
Pauliquevis, T.; Artaxo, P.; Oliveira, P.H.; Paixão, M. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico. *Ciência & Cultura*, vol. 59, n. 3, pp. 48-50, 2007.

Pessoa Jr., O. Medidas Sistêmicas e Organização. In: Debrun, M.; Gonzáles, M.E.; Pessoa Jr., O. (eds.). *Auto-Organização*. Campinas: CLE, vol. 18, pp. 129–161, 1996.

Pigliucci, M. *Denying evolution: Creationism, scientism, and the nature of science*. Sunderland-MA: Sinauer, 2002.

Piqueras, Mercè. Meeting the Biospheres: on the translations of Vernadsky's work. *International Microbiology*. Vol 1, pp. 165-170, 1998.

Ponce, M. *La explicación teleológica*. Coyoacán, México: Universidad Autónoma de México, 1987.

Popper, K. *Lógica da Pesquisa Científica*. Cultrix, São Paulo, [1959]1974.

Postgate, J. Gaia gets too big for her boots. *New Scientist*, vol. 118, n 1607, p. 60. 1988.

Prum, R.O. & Brush, A.H. A controvérsia do que veio primeiro, penas ou pássaros? *Scientific American Brasil*, Vol. 11, pp. 64-73, 2003.

Queiroz, J. & El-Hani, C.N. Semiosis as an Emergent Process. *Transactions of the Charles S. Peirce Society*, vol. 42, n. 1, 2006.

Ricklefs, R.E. *A Economia da Natureza*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.

Robertson, D. & Robinson, J. Darwinian Daisyworld. *Journal of Theoretical Biology*, vol. 195, nº 1, pp. 129-134, 1998.

Rosenberg, A. & McShea, D. *Philosophy of Biology – a contemporary introduction*. New York: Routledge, 2008.

Rosenzweig, C.; Karoly, D.; Vicarelli, M.; Neofotis, P.; Wu, Q.; Casassa, G.; Menzel, A.; Root, T.L.; Estrella, N.; Seguin, B.; Tryjanowski, P.; Liu, C.; Rawlins, S.; & Imeson, A.. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, v. 453, pp. 353-358, 2008.

Sahtouris, E. *EarthDance: Living Systems in Evolution*, Praeger: New York. 2000

Salmon, W.C. *Four Decades of Scientific Explanation*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1990.

- Scheiner, S.M. & Willig, M.R. A general theory of ecology. *Theoretical Ecology*. Vol 1, n. 21, pp. 21-28, 2008.
- Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.
- Schellnhuber, H.J. 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature*, vol. 402, pp. C19-C23, 1999.
- Schellnhuber, H.J. & Held, H. *How fragile is the Earth System? In: Managing the Earth – The Linacre Lectures*. Oxford: Oxford University Press, 2002.
- Schwab, J.J. The structure of the natural sciences. In G. W. Ford & L. Pugno (eds.). *The Structure of Knowledge and the Curriculum*. Chicago: Rand-McNally, 1964.
- Schwartz, S.E. Are global cloud albedo and climate controlled by marine phytoplankton? *Nature*. vol. 336, n° 1, pp. 441-45. 1988.
- Sepulveda, C.; El-Hani, C.N. Adaptacionismo versus exaptacionismo: o que este debate tem a dizer ao ensino de evolução? *Ciência & Ambiente*, no prelo.
- Shepherd, J.; Iglesias-Rodriguez, D.; Yool, A. Geo-engineering might cause, not cure, problems. *Nature*, vol. 449, n. 18, p. 781, 2007
- Simó, R. Production of atmospheric sulphur by oceanic plankton: biogeochemical, ecological and evolutionary links. *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 16, n. 6, pp. 287-294, 2001.
- Sorabji, R. Function. *Philosophical Quarterly*, vol. 14, n. 57, pp. 289-302, 1964.
- Stefels, J. Physiological aspects of the production and conversion of DMSP in marine algae and higher plants. *Journal of Sea Research*, vol. 43, pp. 183–197, 2000.
- Steinke, M.; Malin, G.; Liss, P.S. Trophic interactions in the sea: an ecological role for climate relevant volatiles? *Journal of Phycology*, vol. 38, n. 4, pp. 630–638, 2002.
- Sunda, W.; Kieber, D.J.; Kiene, R.P.; Huntsman, S. An antioxidant function for DMSP and DMS in marine algae. *Nature*, vol. 418, pp. 317–320, 2002.
- Thoreau, H.D. *Walden and Civil Disobedience*. New York, NY: Barnes & Noble Classics, [1854]2003.
- Tickell, C. Gaia and the Human Species. In: Schneider, S.H., Miller, J.R., Crist, E. & Boston, P.J. *Scientists Debate Gaia: The Next Century*. The MIT Press, Cambridge-MA, 2004.

Tickell, C. (Prefácio), in: Lovelock, J.E. *A vingança de Gaia*. Tradução de Ivo Kirtovsky. Intrínseca, Rio de Janeiro, 2006.

Tipler, P. *Física: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica*, vol. 1. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A. Tradução Horacio Macedo, 2000.

Vallina, S.M.; Simó, R.; Gassó, S.; Boyer-Montégut, C.; del Río, E.; Jurado, E.; Dachs, J. Analysis of a potential “solar radiation dose–dimethylsulfide–cloud condensation nuclei” link from globally mapped seasonal correlations. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 21, pp. 1-16, 2007

van Rijssel, M. & Gieskes, W.. Temperature, Light, and the Dimethylsulfoniopropionate (DMSP) Content of *Emiliana huxleyi* (Prymnesiophyceae). *Journal of Sea Research*, vol. 48, nº 1, pp. 17-27, 2002.

Vernadsky, V.I. *Geochemistry and The Biosphere*. Essays by Vladimir I. Vernadsky. [1926] 2007.

Volk, T. *Gaia's Body: toward a physiology of the earth*. New York: Copernicus. 1998

Volk, T. Toward a Future for Gaia theory: an editorial comment. *Climatic Change*, 52, pp. 423-430, 2002.

Volk, T. Seeing Deeper into Gaia theory: a reply to Lovelock's response. *Climatic Change* 57: pp. 5–7, 2003.

Von Bertalanffy, L. *General System Theory: Foundations, Development, and Applications*. London: Penguin, 1973.

Watson, A.J. & Lovelock, J.E.. Biological Homeostasis of the Global Environment: the Parable of Daisyworld. *Tellus, Series B – Chemical and Physical Meteorology*, vol. XXXV, nº 4, pp. 284-289, 1983.

Watson, A.J.; Lovelock, J.E.; Margulis, L. Methanogenesis, fires and the regulation of atmospheric oxygen. *Biosystems*, v. 10, p. 293-298, 1978.

Watson, A.J.; Lovelock, J.E.; Margulis, L. What controls atmospheric oxygen? *Biosystems*, v. 12, p. 123-125, 1980.

Wilkinson, D.M. Gaia and natural selection. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 14, n. 7, pp. 256-257, 1999.

Wilkinson, D.M. The fundamental processes in ecology: a thought experiment on extraterrestrial biospheres. *Biological Reviews*. Vol. 78, Pp. 171-179. 2003

Wilkinson, D.M. *Fundamental Processes in Ecology: an Earth Systems approach*. Oxford: Oxford University Press, 2006.

Williams, G.C. *Adaptation and Natural Selection*. Princeton, NJ: Princeton University Press, [1966]1996.

Wilson, E.O. *Afteward*. In: Carson, R. *Silent Spring*, pp. 357-363, [1962]2002.

Wimsatt, W. Functional Organization, Analogy, and Inference. In: Ariew, A.; Cummins, R.; Robert, P.; Perlman, M. (eds.) *Functions: new essays in philosophy of psychology and biology*. Oxford: Oxford University Press, pp. 173-221, 2002.

WMO. World Meteorological Organization. Disponível em : Winners of the Norbert Gerbier-Mumm International Award. Disponível em:
http://www.wmo.ch/pages/about/awards/winners_mumm.html
Acessado em 20 de outubro de 2007.

Wolfe, G.V.; Steinke, M.; Kirst, G.O. Grazing-activated chemical defence in a unicellular marine alga. *Nature*, vol. 387, pp. 894–897, 1997.

Wouters, A. *Explanation without a cause*. Dissertation Thesis. Leiden Utrecht Research Institute of Philosophy, 1999.

Wouters, A. Philosophers on Function. Essay Review of A. Ariew, Cummins, R. And Perlman, M. (eds) *Functions: New Essays in the Philosophy of Psychology and Biology*. *Acta Biotheoretica*, Vol. 51, nº 3, pp. 223-235, 2003.

Wouters, A. The Function Debate in Philosophy. *Acta Biotheoretica*. Vol. 53: pp. 123-151. 2005.

Wright, L. Functions. In: Allen, C.; Bekoff, M.; Lauder, G. (orgs). *Nature's Purposes – Analyses of Function and Design in Biology*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 51-78, [1973]1998.