

Marcelo Awade

**Pluralismo epistemológico e  
sincretismo cultural:**

**uma resposta às controvérsias da ecologia  
teórica**

**Epistemological pluralism and  
cultural syncretism:**

**a response to the controversies of  
theoretical ecology**

São Paulo, SP  
2016

Marcelo Awade

**Pluralismo epistemológico e  
sincretismo cultural:  
uma resposta às controvérsias da ecologia  
teórica**

**Versão corrigida da tese**

O original encontra-se disponível no Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Paulo Inácio de Knegt  
López de Prado

São Paulo  
2016

## Ficha catalográfica

Awade, Marcelo

Pluralismo epistemológico e sincretismo cultural: uma resposta às controvérsias da ecologia teórica

Número de páginas: 173 páginas

Tese (Doutorado) - Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Departamento de Ecologia.

1. **epistemologia** 2. **pluralismo** 3. **modelagem**

I. Universidade de São Paulo. Instituto de Biociências. Departamento de Ecologia.

## Comissão Julgadora:

---

Prof. Dr.

---

Prof. Dr.

---

Prof. Dr.

---

Prof. Dr.

---

Prof. Dr. Paulo Inácio de Knégt López de Prado  
(Orientador)



# Dedicatória

*Dedico esta tese à minha avó **Salima Ibrahim**,  
que me ensinou muito sobre  
a vida e o amor. Ao **Jorge A. Tirone**,  
por tudo que há de aprender  
nessa jornada que se inicia.*



# Agradecimentos

Concluir esta tese foi uma tarefa difícil, porém a mais intelectualmente recompensante que me predispus a fazer. O desafio que me propus aqui foi muito maior do que eu esperava enfrentar e o que apresento nesta tese não seria possível sem algumas pessoas que me mantiveram minimamente são durante este tempo.

Em primeiro lugar, agradeço a meus pais, Roberto Awade e Célia Regina Netto Awade, às minhas irmãs Fernanda Awade e Luciana Awade, e à minha avó Elzira Machado, por tudo que representam para mim. Acima de tudo por me suportarem! Amo muito vocês!

Agradeço ao Paulo Inácio, meu orientador, que me aceitou em seu grupo e quem me ensinou muito sobre ecologia. Sua calma e sabedoria são entusiasmantes. Obrigado por ter me suportado em momentos difíceis e por ter me dado tantas oportunidades de crescimento intelectual.

Ao Carlos Melián, meu segundo orientador neste doutorado, com quem aprendi muito sobre ciência e sobre a vida fora da academia. Sua genialidade associada à sua simplicidade é algo que me inspirará para sempre. Muito obrigado pela oportunidade e pela amizade que se construiu.

Ao baiano são paulino Charles Santana, pela amizade que fizemos e pela disponibilidade em me ajudar com o possível e o impossível. Valeu mesmo meu rei!

À Vera Lima e à Shirlene por todo o suporte que me deram e pela simpatia com que sempre me atenderam!

A todos os amigos e amigas do LET e da LAGE, que sempre souberam manter o melhor clima. Ao Miúdo e ao Glauco pelo exemplo de ecólogos que são para mim.

Aos grandes amigos da vida, que se não fossem eles, certamente não estaria escrevendo essas palavras agora. Agradeço ao Paulinho (DuDu, Zera), Bogão e Mano, Saci, Dé e Catá, André (Clips) e Laura, Gandhi e Paçoca, Nabo e Dani, Noni e Paulomanos, Sara, Mandai, Rodolpho, Renato, CF, Berton, Kiwi, Bernardo e Cecilia, Melina, Juli, Esther, Jomar, Edu e a muitos outros. Agradeço muito por sempre estarem comigo mesmo eu estando longe.

To the swiss friends, Álvaro, Adrian, Gillu, Jaime, Andrea, Kirsten, Nadine for unforgettable times in Horw-Luzern. And, of course, for the greatest weekly cheese day's! Thank you so much!





# Resumo

Tradições acadêmicas no ensino da ecologia, assim como livros-texto convencionais redigidos de forma enciclopédica muitas vezes mascaram uma história de grandes controvérsias que existe por trás dos fundamentos teóricos desta disciplina. Muitos ecólogos são formados sem se darem conta dos diversos debates conflituosos que certamente circundam o corpo teórico de seus programas de pesquisa. Contudo, basta um aprofundamento mínimo na literatura para que se perceba a grande confusão que se transformou a formalização teórica da ecologia. Com suas raízes na história natural do século XIX e com uma ênfase empiricista, a ecologia passou por uma fase de formalização teórica calcada em uma episteme dedutivo-nomológica e na modelagem matemática de sistemas dinâmicos no começo do século XX. Este enfoque no aspecto conjectural da ecologia se consolidou na década de 1960 e muitos pesquisadores passaram a alegar que este seria o método ideal para a formalização de teorias sólidas e gerais. Entretanto, na década seguinte se inicia um contra-movimento, que criticou duramente esta escola alinhada ao pensamento dos físicos, culminando em debates que resultaram em posturas de radicalismo extremo em relação a qual é o objeto de estudo da ecologia e como o ecólogo deve proceder em sua atividade. Neste momento, passa a ser crucial que o cientista se volte à filosofia e à história das ciências para entender mais profundamente as origens e os motivos dessas confusões. Este conhecimento se faz necessário para que o ecólogo possa se posicionar criticamente dentro destas controvérsias e assim (re)definir seu próprio programa de pesquisa com mais coerência. Contudo, é preciso estar preparado para uma jornada psicologicamente intensa. Para muitos, esta empreitada histórico-filosófica gera um sentimento de frustração (no mínimo um grande desconforto intelectual) ao perceberem que a epistemologia não provê uma resposta simples e consensual para perguntas muito básicas como: o que é um conhecimento cientificamente válido? Quais são os fundamentos da teoria ecológica? A falta de treinamento em epistemologia associado à uma relutância psicológica em se envolver na área, mantiveram grande parte dos ecólogos afastada do debate filosófico, fazendo com que alguns equívocos sobre a ciência ecológica se propagassem por gerações. Assim, disputas intermináveis se sucederam na literatura dividindo os ecólogos ao invés de unir-los. Criou-se uma sensação geral de que há uma dicotomia entre teoria e empiria (também vista na forma de uma dicotomia conjectura-inferência), o que me parece um problema grave pois essa divisão é ilusória; a ciência é uma fusão desses dois componentes. Esta percepção dicotômica se estende a outros temas epistemológicos muito relevantes (*e.g.* indução ou dedução, descrição de padrões ou explicação por processos e mecanismos causais, generalidade ou precisão), o que a meu ver é prejudicial para um avanço fluente do conhecimento. Esta tese é uma tentativa de contextualizar historicamente o desenvolvimento do pensamento ecológico e revisar criticamente o debate epistemológico científico, assim como algumas controvérsias heurísticas relacionadas à modelagem de padrões e processos ecológicos, para então prover um argumento favorável ao pluralismo epistemológico na ecologia. Ao final, faço uma síntese das controvérsias epistemológicas, apresentando uma proposta de como conceber um programa de pesquisa em ecologia aberto ao pluralismo epistemológico. Para isso, valerei-me da noção de caixa preta epistemológica e de redes complexas de conhecimento tanto para mostrar que o pluralismo epistemológico pode ser visto como uma questão cultural intrínseca da ciência, como também para sugerir que uma postura colaborativa em detrimento de uma competitiva (conflituosa) é muito mais intuitiva e coerente para um ecólogo do século XXI. Acredito que uma predisposição ao sincretismo cultural em detrimento de um etnocentrismo “irracional” tem

X

grande potencial de catalisar o avanço atravancado e controverso da ciência ecológica.

# Abstract

Academic traditions in teaching ecology, as well as conventional encyclopedical textbooks often mask a history of great controversies behind the theoretical bases of this discipline. Many ecologists are trained without realizing the many conflicting debates that surround the theoretical body of the research programs they are inserted in. However, a simple deepening in the literature is enough to sense the confusion that theoretical formalization of ecology has become. With its roots in 19th century natural sciences and with empiricist emphasis, ecology went through a phase of theoretical formalization based on a deductive-nomological epistemology and in mathematical modeling of dynamic systems in the beginning of 20th century. This focus on the conjectural aspect of ecology consolidated in the 60's and many researchers claimed this would be the ideal method to formalize solid and general theories. Yet in the following decade a counter-movement began, strongly criticizing this school of thought aligned with physicists, culminating in debates that resulted in extreme radicalism regarding the definition of ecology's study subject and how the ecologist should proceed in his activity. At this point it becomes crucial to the scientist to face philosophy and the history of sciences to further understand the origins and reasons for these confusions. This knowledge enables the ecologist to critically position oneself within these controversies and thus (re)define his own research program coherently. One should be prepared however, for an intense psychological journey. For many this historical-philosophical quest brings a sense of frustration (a great intellectual discomfort at least) since the epistemology does not provide a simple and consensual answer to basic questions such as: what is a valid scientific knowledge? What are the bases of ecological theory? This way, the lack of training in epistemology associated with psychological reluctance to get involved in this area, have kept most ecologists away from the philosophical debate, allowing some mistakes and misconceptions about the ecological sciences to propagate for generations. Thus, endless disputes in the literature divided ecologists instead of uniting them. A general sense was created that there is a dichotomy between theory and empiricism (also seen as a dichotomy between conjecture-inference), which seems to me as a serious problem given this division is illusory; science is the fusion of these two components. This dichotomous perception extends to other very important epistemological themes (e.g. induction or deduction, pattern description or explanation through causal processes and mechanisms, generality or precision), what hampers the advancement of ecological knowledge. This thesis is an attempt to contextualize historically the development of ecological thought and critically review the scientific epistemological debate, as well as some heuristic controversies related to modeling of ecological patterns and processes, to provide a favorable argument towards an epistemological pluralism in ecology. Finally, I synthesize the epistemological controversies, proposing how to conceive a research program in ecology opened to epistemological pluralism. For such I'll make use of the notion of an epistemological black box and of complex knowledge networks, both to show that epistemological pluralism can be seen as a cultural matter intrinsic to science, and also to suggest that a collaborative attitude instead of a competitive (conflicting) is much more intuitive and coherent with the 21st century ecologist. I believe that a predisposition to cultural syncretism in place of an "irrational" ethnocentrism has great potential to catalyze the advancement of the hampered and controversial science of ecology.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução Geral: um panorama histórico do pensamento ecológico</b>	<b>1</b>
1.1	História natural, darwinismo e os antecedentes da ecologia no século XIX . . . . .	3
1.2	A consolidação científica da ecologia no século XX e a origem de importantes controvérsias . . . . .	8
1.2.1	Galton, Pearson e o ambiente intelectual da transição dos séculos XIX e XX . . . . .	9
1.2.2	A ecologia depois de Haeckel . . . . .	11
1.2.3	O amadurecimento teórico da ecologia . . . . .	16
1.2.4	Alguns limites da modelagem matemática . . . . .	22
1.3	Pluralismo epistemológico e o futuro da ecologia . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Conflitos e disputas em controvérsias epistemológicas: um rumo contra-intuitivo para o cientista do século XXI</b>	<b>33</b>
2.1	O que vale como conhecimento científico? . . . . .	35
2.2	Contexto histórico-filosófico da ciência entre os séculos XV e XX . . . . .	39
2.3	Desdobramentos da tese auto-corretiva no século XX . . . . .	48
2.4	Busca por generalizações e a discussão do caráter nomológico da ecologia . . . . .	58
2.5	Síntese das controvérsias epistemológicas . . . . .	66
2.5.1	Proposições gerais . . . . .	72
<b>3</b>	<b>Pluralismo heurístico: relações entre modelagem e epistemologia</b>	<b>77</b>
3.1	Probabilidade, variabilidade e amostragem: a estatística inferencial e sua influência nas ciências biológicas . . . . .	80
3.2	Equações diferenciais, algoritmos de simulação e as limitações da modelagem espaço-temporal de sistemas dinâmicos estocásticos . . . . .	95
3.2.1	Modelos de equação diferencial em ecologia de populações . . . . .	97
3.2.2	A empreitada da modelagem por simulações computacionais: o florescimento de uma nova controvérsia . . . . .	108
3.3	Conclusão . . . . .	113
<b>4</b>	<b>Síntese geral: o pluralismo epistemológico e as redes complexas de conhecimento</b>	<b>121</b>
4.1	Princípios gerais e ensinamentos prévios . . . . .	124
4.2	Abrindo a caixa preta epistemológica . . . . .	133
4.3	Programas de pesquisa adaptativos e alguns aspectos sociológicos da ciência . . . . .	141
4.4	Ciência: uma rede complexa de conhecimento formada por cientistas interagentes . . . . .	145
4.5	Considerações finais . . . . .	147
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>153</b>
5.1	Perspectivas futuras . . . . .	156



# **Capítulo 1**

## **Introdução Geral: um panorama histórico do pensamento ecológico**

Ecologia é uma disciplina consolidada nos programas de graduação em ciências biológicas das principais universidades do país e do mundo. O estabelecimento desta disciplina no ambiente acadêmico, aliada à sua crescente popularização fora dos restritos limites da academia, pode gerar a falsa impressão de que a ecologia possui uma teoria consolidada. No entanto, este ramo das ciências naturais é marcado por profundos debates referentes aos seus fundamentos teóricos que já se estendem por décadas. Muito se discute sobre qual é o real objeto de estudo da ecologia e se os meios utilizados para se compreender os fenômenos ecológicos de fato legitimam a cientificidade do conhecimento produzido pelos ecólogos (Weiner, 1995; Murray, 2000; Cooper, 2003). Compreender minimamente estes debates se tornou indispensável para eu atingir um entendimento claro de meu ofício como ecólogo, das reais aplicações dos estudos que desenvolvo e dos limites conceituais e práticos das inferências derivadas desses estudos.

Suponho que todo ecólogo ciente de sua atividade um dia se deparou com um problema filosófico similar, seja como forma de fortalecer ou desfazer suas ideias ou conceitos prévios, seja publicamente na tentativa de convencer alguém da adequação e relevância de sua pesquisa. Contudo, os aspectos filosóficos da ciência são geralmente omitidos nos livros texto básicos ou pouco debatidos em disciplinas biológicas. Em geral, os cientistas costumam se esquivar da filosofia, pois como Simberloff (1983, p. 626) diz, a densa escrita formal dos filósofos “*parece tediosa, inventada e supérflua*”<sup>1</sup>. Para um cientista que inicia sua carreira no século XXI, muitas das controvérsias como a citada no parágrafo anterior (*i.e.* cientificidade da ecologia) parecem inicialmente obtusas. Esta percepção pode causar dúvidas paralisantes a este cientista em começo de carreira, atravancando sua prática convencional até que um mínimo de esclarecimento possa ser dado aos problemas epistemológicos. Enfatizo, portanto, que cabe a este cientista investigar o que os epistemólogos discutem, a fim de que ele possa fundamentar criticamente seu posicionamento frente aos problemas filosóficos que a ciência o apresenta. Uma rápida imersão na filosofia das ciências já nos revela um mundo complexo, fundamentado em profundas controvérsias a respeito da racionalidade do conhecimento científico. Em meio a esta confusão, cabe ao cientista analisá-la criticamente e sintetizá-la de forma coerente em seu programa de pesquisa. Este será meu objetivo nesta tese, em que exporei uma argumentação favorável ao pluralismo epistemológico na ciência.

Além da fragilidade filosófica da formação de muitos cientistas, é necessário destacar que raramente se observa uma preocupação em se ensinar como os conceitos, teorias e modelos ecológicos se desenvolveram historicamente. A meu ver, é imprescindível conhecermos a história de um campo cientí-

---

<sup>1</sup>Como se diz informalmente, o cientista não se preocupa em explicar a ciência, mas sim em fazê-la.



fico não somente para se entender o contexto em que as teorias surgem, mas também para dar coerência às discussões que se observam na literatura. Como observado por McIntosh (1985, p. ix):

*... some of the difficulties and conflicts now manifest in ecology can be better resolved if ecologists, particularly younger ecologists, become familiar with what went before them and their mentors and outside their immediate interests.*

Portanto, neste capítulo introdutório, procurarei apresentar um panorama histórico da evolução do pensamento ecológico, desde Darwin até os dias de hoje, a fim de preparar (contextualizar) o leitor para a discussão filosófica que desenvolverei no corpo central desta tese. Ao final deste capítulo, apresentarei o conceito de pluralismo epistemológico que adotarei, além da estrutura geral da tese com seus objetivos mais específicos.

## 1.1 História natural, darwinismo e os antecedentes da ecologia no século

### XIX

Traçar precisamente as raízes da ecologia é uma tarefa muito mais complicada que simplesmente estabelecer um marco inicial, visto que esta é uma disciplina polimórfica, com uma origem multidisciplinar (cf. Kingsland, 1985, p. 23; McIntosh, 1985). McIntosh resume esta dificuldade com uma metáfora bem elucidativa:

*... (this discipline) encounters problems in identifying roots simply because ecology is, to continue the botanical metaphor, more a bush with multiple stems and a diffuse rootstock than a tree with a single, well defined trunk and roots.*

McIntosh (1985, p. 7)

Entretanto, convencionou-se que a ecologia se inicia com a publicação da obra *Generelle Morphologie der Organismen* de Ernst Haeckel em 1866, na qual o autor cunha o termo “Ecologia” (*Ökologie*) e propõe a primeira tentativa de uma definição formal para esse termo (Stauffer, 1957; McIntosh, 1980).

Tal qual traduzido por Stauffer (1957, p. 140), Haeckel escreveu:

*By ecology we mean the whole science of the relations of the organism to the environment including, in the broad sense, all the “conditions of existence”. These are partly organic, partly inorganic in nature; both, as we have shown, are of the greatest significance for the form of organisms, for they force them to become adapted.*

Três anos após a publicação de *Generelle Morphologie der Organismen*, em uma aula inaugural da faculdade de filosofia de Jena (cf. Stauffer, 1957), Haeckel faz o que talvez seja sua afirmação mais contundente sobre o que pensava da ecologia:

*... in a word, ecology is the study of all those complex interrelations referred to by Darwin as the conditions of the struggle for existence. This science of ecology, ..., has thus far formed the principal component of what is commonly referred to as Natural History.*

Haeckel [1869, p. 17, como traduzido por Allee et al. (1949, p. v)]

Embora seja precipitado creditar a fundação da ecologia a Haeckel, sua definição põe em evidência aspectos essenciais da ecologia moderna, além de ser um ótimo ponto de partida para introduzir as controvérsias elementares da disciplina e a confusão que se transformou a epistemologia ecológica um século depois desta definição (cf. Cooper, 2003). A proposta haeckeliana sugere que a compreensão dos fenômenos que levam à existência das espécies tal qual se observa na natureza depende do estudo não somente das interações entre os organismos e os fatores abióticos do ambiente, mas também das interações bióticas. No entanto, “... *Haeckel não mostrou nenhum esclarecimento notável sobre os princípios dinâmicos da ecologia*” (Stauffer, 1957, p. 138). O morfologista alemão atuou mais como um porta-voz de Charles Darwin na Alemanha, livre de pretensões que não fossem a disseminação da então nova teoria do naturalista inglês (Stauffer, 1957). Contudo, este alinhamento com a teoria da origem das espécies por seleção natural revela a forte ligação entre ecologia e evolução, chamando a atenção para o papel de fatores históricos e contingências na formação dos padrões da natureza. Por último, mas não menos importante, Haeckel coloca a história natural a serviço da ecologia, evidenciando a relação intrínseca existente entre esses dois campos do conhecimento biológico.

Estabelecer uma definição precisa para história natural é ainda mais problemático e não cabe aqui fazer uma revisão completa sobre a concepção do termo e a filosofia naturalista. Sucintamente, a história natural a que refiro-me é uma forma de se conceber e estudar a natureza iniciada no século XVII - quando alguns membros das sociedades europeias passaram a financiar as primeiras grandes expedições para estudos *in situ* e coletas de novos espécimes da diversidade biológica em áreas inexploradas do planeta - e que tem seu auge em meados do século XIX. Por dois séculos, o trabalho daqueles que promoveram esta vertente da história natural se caracterizou pela forte ênfase na observação, descrição e classificação das espécies, no registro dos fatos da natureza tais quais eles ocorrem e, particularmente, pela coleta de um grande volume de material biológico para atender a colecionadores particulares e museus de história natural da época. Em conjunto, estas práticas impulsionaram sobremaneira o desenvolvimento da taxonomia, da zoologia e da botânica<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Um exemplo emblemático do amadurecimento da história natural foi a reforma no sistema de nomenclatura e classificação das espécies proposto por Linnaeus em meados do século XVIII e utilizada até hoje.

No início do século XIX, os naturalistas, incluindo zoólogos e botânicos, haviam acumulado uma quantidade massiva de informação sobre inúmeras espécies e diversas evidências que apontavam para o até então inconcebível: que as espécies atuais poderiam ser originadas de outras espécies pré-existentes. Nesta época, este tipo de concepção entrava em choque com um valor fundamental das sociedades cristãs europeias onde essas ideias se originaram. Conceber a transmutação das espécies implicava em negar o criacionismo (portanto, Deus) e em assumir as severas consequências, sociais e psicológicas, desta postura. Alguns naturalistas não negligenciaram as claras evidências do que observavam e ousaram desafiar os dogmas eclesiásticos ao se perguntarem porque tantas espécies habitam o planeta e porque elas apresentam restritos padrões de distribuição geográfica? É mesmo possível que as espécies se originem de ancestrais pré-existentes e, se sim, porque isso ocorre?

Os novos problemas intelectuais que despontavam no século XIX criaram uma demanda pela identificação das leis naturais que dessem conta de resolvê-los e, assim, preencher o vazio que seria deixado pela abolição da lei divina da criação. Pioneiro nessa empreitada, Jean-Baptiste Lamarck propôs algumas leis<sup>3</sup> para explicar a transmutação das espécies que tiveram ampla repercussão no início do século. Já no segundo parágrafo de seu célebre livro *The origin of species*, Charles Darwin comenta:

*Lamarck was the first man whose conclusions on the subject excited much attention. This justly-celebrated naturalist . . . upholds the doctrine that species, including man, are descended from other species. He first did the eminent service of arousing attention to the probability of all change in the organic, as well as in the inorganic world, being the result of law, and not of miraculous interposition.*

Darwin (1859 [1979], p. 54)

Embora não tenha se consolidado na biologia, não se pode negar que a teoria de Lamarck teve influência sobre o pensamento de Darwin, quando este compôs sua teoria evolutiva para explicar a origem da enorme variedade de formas de vida que habitavam o planeta, como ficará claro adiante. Devo notar que o desenvolvimento desta teoria e sua transformação em um paradigma entre os biólogos contou com a contribuição marcante de Alfred Russel Wallace, outro exímio naturalista britânico.

Darwin e Wallace, após longas expedições ao redor do mundo construíram uma argumentação para mostrar que a evolução das espécies não se devia a uma tendência natural à complexidade, como

---

<sup>3</sup>A lei do uso e desuso, pela qual as características desenvolvidas pelos progenitores ao longo de suas vidas eram transmitidas aos seus descendentes, é o exemplo clássico da teoria lamarckiana, embora muito mais antiga que ele. Entretanto, o que causou maior controvérsia foi a lei do desenvolvimento progressivo, pela qual os organismos tenderiam a *evoluir* progressivamente de formas simples para mais complexas. Outro ponto digno de nota é que Lamarck não descartava o princípio de geração espontânea para o surgimento de espécies consideradas mais simples, como microrganismos unicelulares.

proposto por Lamarck, mas decorria da simples ação de um mecanismo natural de seleção, o qual atuaria, ao longo das gerações, favorecendo os indivíduos que possuíssem melhores adaptações ao ambiente em que a espécie ocorre (Darwin e Wallace, 1858; Darwin, 1859 [1979]). Tradicionalmente, convencionou-se expressar esta teoria pela lei da *sobrevivência do mais adaptado*<sup>4</sup> e, embora não concordassem em todos os detalhes, estes naturalistas souberam apresentá-la com muita clareza e com um volume extraordinário de evidências a seu favor. Uma demonstração desta clareza pode ser extraída de Wallace (1867, p. 472). Com o intuito de esclarecer algumas críticas à obra de Darwin feitas pelo Duque de Argyll, importante nobre escocês, Wallace argumenta que poderia *deduzir* a seleção natural a partir de seis leis consideradas indisputáveis e “*meras afirmações de fatos admitidos*”. São elas: i) a lei da multiplicação em progressão geométrica, ii) lei das populações limitadas, iii) lei da hereditariedade, iv) lei da variação (“*nenhum ser neste globo terrestre é igual a outro, afinal*”), v) lei da incessante mudança das condições físicas sobre a superfície da Terra e, por último, vi) o equilíbrio ou harmonia da natureza. Aceitando-se esses princípios, a seleção natural torna-se inevitável<sup>5</sup>.

Como seria de se esperar para uma proposta tão revolucionária, a teoria da seleção natural não foi prontamente aceita. Por um lado, haviam aqueles, como o Duque de Argyll, que a descartavam totalmente insistindo em *pregar* o criacionismo como lei fundamental e desconstruí-la com discursos considerados absurdos por Wallace (veja a discussão em Wallace, 1867). Em suas notas autobiográficas, Darwin expressa, as vezes com rispidez, sua opinião sobre as leis divinas, como pode ser visto no excerto abaixo:

*... I... have never since doubted even for a single second that my conclusion was correct. I can indeed hardly see how anyone ought to wish Christianity to be true; for if so the plain language of the text seems to show that the men who do not believe, and this would include my Father, Brother and almost all my best friends, will be everlastingly punished.*

*And this is a damnable doctrine.*

*(Darwin e Barlow, 1958 [1887], extraído da edição publicada em 1958 com apêndices e notas de sua neta Nora Barlow; p. 87)*

Wallace, ainda insatisfeito com o rumo da discussão, mais uma vez enfatiza seu ponto de vista logo nas primeiras páginas de seu clássico livro *Island life*, no qual desenvolve sua teoria biogeográfica para explicar a distribuição e evolução das espécies em ilhas. Ele diz:

---

<sup>4</sup>Da expressão: *the survival of the fittest*.

<sup>5</sup>Muito embora a última lei referente ao equilíbrio da natureza seja discutível e sua validade ou, simplesmente, necessidade para a argumentação da teoria darwinista seja motivo de debates ainda hoje (cf. Cooper, 2003); Duas dessas leis são condensadas na conhecida lei malthusiana em homenagem a Thomas Malthus, a qual mereceu um capítulo intitulado com o lema mais emanado pelos evolucionistas, *the struggle for existence*.

*We further have to make use of the theory of “descent with modification” as the only possible key to the interpretation of the facts of distributions, and this theory has only been generally accepted within the last twenty years. It is evident, that, so long as the belief in “special creations” of each species prevailed, no explanation of the complex facts of distribution could be arrived at or even conceived; for if each species was created where it is now found no further inquiry take us beyond that fact, and there is an end of the whole matter.*

(Wallace, 1880, p. 8)

Apesar de parecer consenso entre os cientistas atuais que a teoria proposta por Darwin e Wallace é indisputável, o criacionismo continuou impondo uma barreira à aceitação do darwinismo pelo senso comum. Portanto, se podemos considerar que o ofício do ecólogo está alinhado ao darwinismo, como Haeckel propôs, talvez esta tenha sido a primeira grande controvérsia que a ecologia, como disciplina, se deparou: existem leis naturais ou a lei é divina?

Por outro lado, a proposta de Darwin, em específico, carecia de explicações mais convincentes para a hereditariedade e esse foi um alvo de críticas entre os seguidores da teoria da seleção natural. Em relação aos mecanismos de hereditariedade, Darwin não discordava totalmente de Lamarck, uma vez que não negava a transmissão de características por uso e desuso em sua teoria da pangênese. A lei da transmissão de caracteres adquiridos começou a ser invalidada somente no fim do século, em especial, com os estudos de Francis Galton e de August Weismann (*e.g.* Galton, 1871; Weismann, 1885; Galton, 1886). O primeiro elaborou um famoso, porém contestado, experimento envolvendo a transfusão de sangue em coelhos de diferentes raças para desenvolver uma teoria que descredenciava a herança por pangênese (Galton, 1871; Darwin, 1871). Nesta pesquisa, Galton não constatou evidências claras da existência de *gêmulas* responsáveis por condensar e transmitir as características do progenitor à progênie, refutando a hipótese pangênica. Anos depois, Galton, que também inicia uma abordagem biométrica para testar as hipóteses darwinianas, chega a uma lei que ressaltou um outro aspecto da hereditariedade que invalida a transmissão de características adquiridas. Estudando dados biométricos de plantas e humanos, desenvolve a lei da “*regressão à mediocridade*”, pela qual, na ausência de uma pressão para a seleção, as características dos indivíduos de uma espécie tenderiam a retornar para os valores médios observados nas primeiras gerações analisadas, mesmo que os progenitores apresentem valores extremos da característica (Galton, 1886). Esta abordagem mais experimental e biométrica, como será mostrado na próxima seção, veio fundamentar as bases da estatística moderna, disciplina que, segundo Salsburg (2001), revolucionou a ciência no século XX.

Weismann, por sua vez, pertence a uma *linhagem* de pesquisadores que derivam de uma vertente da história natural que passou a estudar a natureza dentro do laboratório após a invenção do microscópio no século XVII, dando origem ao que hoje se chama biologia celular<sup>6</sup>. Weismann foi responsável por outra descoberta revolucionária para a época, que ligava o processo de meiose à hereditariedade (Weismann, 1885), e que pode ser enunciada pela seguinte lei: o conteúdo da herança está nas células germinativas dos progenitores, e nada que ocorre nas células somáticas é transmitido aos descendentes. A teoria de Weismann aliada à lei da *regressão para mediocridade* era a evidência necessária para esclarecer os mecanismos de hereditariedade (Wallace, 1889, capítulo 14).

O século XIX, portanto, se destacou por uma forte mudança na forma de pensamento humano, particularmente do científico. Procurei mostrar como a concepção de leis naturais adentra no pensamento dos historiadores naturais da época e como isso se associa à formação do que convencionou-se chamar biologia e, em particular, ecologia. A noção de lei natural já era conhecida e usada entre os físicos muitos séculos antes, porém distinta da concepção que se desenvolveu na biologia. Como ficará evidente adiante nesta tese, estas visões entrarão em choque no século XX.

## **1.2 A consolidação científica da ecologia no século XX e a origem de importantes controvérsias**

A transição do século XIX para o XX pode ser vista como um período de assimilação do darwinismo no escopo da pesquisa desenvolvida nos diversos ramos da ciências biológicas que despontaram na época. O processo de assimilação desta teoria envolveu tanto o abandono de antigos, como a elaboração de novos conceitos e, conseqüentemente, levantou uma nova gama de questões para serem investigadas cientificamente. Nesse sentido, retomarei dois grandes temas de investigação abordados na seção anterior: i) as pesquisas em hereditariedade desenvolvidas por Galton e ii) a proposta de Haeckel em relação ao estudo das *complexas interrelações referidas por Darwin como as condições para a luta pela existência*. Discorrer sobre esses dois temas me auxiliará a apresentar, com um pouco mais de clareza, a origem da

---

<sup>6</sup>Estes naturalistas chegam à formalização de uma teoria celular, proposta por Matthias Schleiden e Theodor Schwann em 1838, caracterizada pela lei em que todo organismo é composto por células, assim como todos os tecidos e órgãos em seres multicelulares. A teoria celular se encorpa 20 anos mais tarde com a lei *omnis cellula ex cellula*, na qual toda célula provém de outra célula (Virchow, 1860). Curiosamente, esta lei é atribuída ao alemão Rudolf Virchow, mentor de Haeckel e oponente ardente de Darwin.

miscelânea complexa de tópicos sobre os quais os ecólogos versam atualmente, assim como os motivos pelos quais a resolução dos problemas teóricos em ecologia passou a depender da elaboração e análise de modelos. Em conjunto, estes tópicos estão envolvidos em algumas controvérsias fundamentais da ecologia que serão tratadas ao longo da tese.

### 1.2.1 Galton, Pearson e o ambiente intelectual da transição dos séculos XIX e XX

Sir Francis Galton foi um pesquisador com um leque muito variado de interesses e que após a publicação da teoria de seu primo, Charles Darwin, dedicou muito do seu tempo ao estudo dos padrões de hereditariedade em humanos como forma de demonstrar experimentalmente a validade desta teoria (Galton, 1886; Pearl, 1914). As pesquisas desenvolvidas em seu Laboratório Biométrico na segunda metade do século XIX consistiam basicamente em medir as diversas características das espécies, como peso, tamanho corpóreo ou de partes de um organismo, a fim de se compreender não somente os padrões de herança, mas também as possíveis correlações entre as características medidas. Ao fundar uma nova linha de pesquisa, a biometria, Galton chama a atenção para algumas noções que contribuíram enormemente para o amadurecimento científico da biologia e que, de certa forma, provocaram mudanças no escopo das ciências como um todo. As pesquisas conduzidas por este cientista e seus colaboradores destacaram a noção de quantificação e experimentação como atividades essenciais da ciência e que necessitavam ser incorporadas na pesquisa biológica. Galton ressaltou a importância de se investigar quantitativamente a noção de variabilidade na natureza (*e.g.* nos fatores que caracterizam uma espécie), outro aspecto chave da teoria darwinista cujos padrões precisavam ser decifrados. Salsburg (2001, p. 12) descreve Galton como aquele que colocou *rigor matemático nas ciências biológicas por meio do estudo de padrões numéricos*, o que pode ser claramente observado em seu clássico trabalho sobre regressão já comentado na seção anterior (Galton, 1886). Entretanto, devo notar que a matemática de Galton possuía algumas limitações. Foi somente após seu encontro com Karl Pearson que o *rigor matemático* almejado por Galton realmente se concretiza (Pearl, 1914; Salsburg, 2001).

Pearson foi um pesquisador muito prolífico e com uma forma assertiva de expressar sua visão de mundo, que acabaram tornando-o uma figura polêmica no ambiente acadêmico das primeiras décadas do século XX. Após finalizar sua formação em sociologia e história na Alemanha, onde teve contato formal com a matemática e a física em seus estudos, Pearson retorna à Inglaterra, na década de 1880, disposto a reorganizar os fundamentos científicos e descrever uma nova classificação para a ciência, englobando

todas as suas vertentes e, com isso, propor uma finalidade para este campo da atividade humana. Esta ambição fica evidente em uma de suas principais obras, *The grammar of science* (i.e., A gramática da ciência), publicada em 1892 e cuja segunda edição, oito anos mais tarde, incluiu dois capítulos adicionais destinados a uma discussão sobre a teoria evolutiva e seu papel para a ciência (Pearson, 1900). Logo nas primeiras páginas desta segunda edição, Pearson deixou claro três aspectos essenciais de sua filosofia. Primeiro, o de que o papel da ciência não é explicar mas sim descrever<sup>7</sup>. Segundo, o de que a essência de qualquer ciência reside em seu método, não no objeto específico de estudo. E terceiro, o de que a ciência deve ser popularizada uma vez que o método científico seria o único capaz de garantir argumentos claros, objetivos e inequívocos para subsidiar a tomada de decisões importantes em qualquer âmbito de uma sociedade civilizada, seja político, econômico ou ético-moral<sup>8</sup>. A meu ver, embora sua visão geral seja, de fato, bem restritiva, não considero este um motivo que justifique negligenciar os avanços que Pearson proporcionou às ciências.

Focando novamente nas ciências biológicas, assim que retornou à Inglaterra, Pearson foi apresentado aos problemas quantitativos levantados pelo Laboratório de Biometria e, rapidamente, conseguiu concretizar uma colaboração duradoura com Galton, a qual rendeu-lhe a fama de ser o principal defensor e desenvolvedor das ideias do biometrista. Dentre os inúmeros frutos desta colaboração, está a derivação da clássica expressão algébrica para o cálculo do coeficiente de correlação, que generaliza o cálculo rudimentar e baseado em casos especiais usado por Galton em suas regressões (Pearson, 1896). Pearson também percebeu que os padrões de variação de qualquer atributo de uma espécie poderiam ser descritos por distribuições probabilísticas. Esta visão probabilística da natureza dos dados observados se contrapôs fortemente à concepção de mundo determinística prevalecente até então. Esse assunto será mais aprofundado no capítulo 3, no entanto cabe notar que, ao aprimorar a noção de distribuição de probabilidades, Pearson modernizou a estatística. Evidentemente, esta visão probabilística de mundo, foi

---

<sup>7</sup>No prefácio à segunda edição de *A gramática da ciência*, Karl Pearson diz: “Step by step men of science are coming to recognise that mechanism is not at the bottom of phenomena, but is only the conceptual shorthand by aid of which they can briefly describe and resume phenomena. That all science is description and not explanation ...” (Pearson, 1900, p. vii)

<sup>8</sup>A visão de Pearson pode ser sintetizada neste excerto: “I want the reader to appreciate clearly that science justifies itself in its methods, quite apart from any serviceable knowledge it may convey. We are too apt to forget this purely educational side of science in the great value of its practical applications. ... Science ... leads us to classifications and systems, independent of the individual thinker, to sequences and laws admitting of no play-room for individual fancy, must we rate the training of science and its social value higher than those of philology and philosophy. Herein lies the first, but of course not the sole, ground for the popularisation of science. That form of popular science which merely recites the results of investigations, which merely communicates useful knowledge, is from this standpoint bad science, or no science at all.” (Pearson, 1900, p. 10)



alvo de duras críticas, portanto fonte de mais uma grande controvérsia. No capítulo 3, tratarei mais especificamente das diversas abordagens de modelagem em ecologia e esses aspectos filosófico-conceituais serão explicados.

As pesquisas biométricas no laboratório de Galton, associadas às *contribuições matemáticas para a teoria da evolução*<sup>9</sup> de Pearson e a redescoberta dos estudos do monge Gregor Mendel por William Bateson em 1900, estimularam sobremaneira o aparecimento de uma nova disciplina: a genética (*e.g.* Pearson et al., 1899; Bateson, 1900; Pearson, 1904). Neste momento, pode parecer estranho conduzir meu discurso para o campo da genética, porém foi nesta disciplina que a estatística encontrou um ambiente propício para evoluir entre as ciências biológicas. O uso de modelos estatísticos só fora devidamente incorporado na pesquisa em ecologia décadas mais tarde, como pode se observar pela literatura ecológica depois de 1980. Além disso, é importante mencionar que o desenvolvimento teórico em genética, em particular no ramo denominado genética de populações, guarda muitas semelhanças com desenvolvimento teórico em ecologia, já que muitos dos problemas enfrentados em ambas as disciplinas são análogos (como conciliar experimentos, observações e teoria na composição de um arcabouço teórico unificado? *cf.* Kingsland, 1985; Vellend, 2010). Entretanto, assim como com a estatística, um contato formal entre genética e ecologia ocorreu somente na segunda metade do século XX.

## 1.2.2 A ecologia depois de Haeckel

Até o momento, detive-me a introduzir alguns aspectos gerais do ambiente intelectual e científico onde a ecologia aflorou. Após grande ênfase dada à influência de Darwin em ramos da biologia que derivaram da vertente mais laboratorial-experimental do naturalismo, o leitor desta tese deve estar se perguntando: afinal, o que sucedera com aquela vertente naturalista mais expedicionária, a qual se dispunha a compreender a natureza observando-a em campo e descrevendo os padrões da vida *selvagem*? Pois bem, o estudo das *complexas inter-relações referidas por Darwin como as condições para a luta pela existência*, aspecto fundamental da ecologia tal qual a concebemos hoje, passou despercebida pelos holofotes da academia por décadas desde Haeckel.

No século XIX, aqueles naturalistas que se dedicavam à exploração e descrição do mundo sel-

---

<sup>9</sup>*Mathematical contributions to the theory of evolution* foi uma série de 12 artigos publicados por Pearson e colaboradores, entre 1893 e 1904, no periódico *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (A)*.

vagem podiam ser divididos em dois grandes grupos: zoólogos e botânicos. Muitos deles continuaram fazendo o que sempre fizeram ignorando completamente a teoria darwinista e simplesmente movidos pela aventura e pelo financiamento que recebiam<sup>10</sup>. Não obstante, houve aqueles que resolveram fazer a nova ciência biológica progredir sob a luz científica da teoria da seleção natural. Parte desses pesquisadores se dedicou a reorganizar a taxonomia e classificação dos seres vivos estudando o imenso volume de material biológico depositado nos museus como resultado das grandes expedições naturalistas. Outra parte considerável passou a se dedicar ao estudo das relações entre os organismos, sobretudo de plantas, e os aspectos físico-químicos ou climáticos do ambiente, um ramo de pesquisa fortemente associada à fisiologia (Kingsland, 1985; McIntosh, 1985) e, portanto, praticado quase que exclusivamente em laboratório ou estações experimentais. Esta linha, sem dúvida contribuiu notavelmente para o avanço da ecologia, em especial para o entendimento de padrões macroecológicos de distribuição das espécies, assim como, dos aspectos adaptativos ligados à diversificação morfo-anatômica dos seres vivos (McIntosh, 1980). Essa divisão da prática naturalista entre taxonomistas e fisiologistas, segundo Elton (1927, p. 2), justifica “*a morte temporária dos trabalhos científicos em ecologia animal*” no período de transição entre os séculos XIX e XX.

A ecologia só existe tal qual a conhecemos hoje porque uma parcela pequena dos naturalistas se interessaram em compreender as complexas interações entre os organismos e dedicaram-se à descrever e quantificar os padrões de composição de espécies das comunidades de seres vivos que habitam um dado local, assim como entender a dinâmica das relações tróficas nessas comunidades. A noção de “comunidades”, um conceito abstrato e com múltiplas definições como muitos outros em ecologia, aflorou no final da década 1880 e tornou-se um componente fundamental do pensamento desses primeiros ecólogos. Preciso notar aqui que este período da história é muito bem apresentado por Kingsland (1985) e enriquecido de detalhes e ilustres personagens em McIntosh (1985). Continuarei o desenvolvimento de meu raciocínio seguindo a historiografia de (McIntosh, 1985) e, principalmente, de Kingsland (1985).

---

<sup>10</sup>Em referência a esse tipo de naturalista do final do século XIX, Wallace fez uma dura crítica, como nota de rodapé, em seu clássico *Island Life*: “I cannot avoid here referring to the enormous waste of labour and money with comparatively scanty and unimportant results to natural history of most of the great scientific voyages of the various civilized governments during the present century. All these expeditions combined . . . have brought home fragmentary collections, made in widely scattered localities, and these have been usually described in huge folios, whose value is often in inverse proportion to their bulk and cost. The same species have been collected again and again, often described several times over under new names, and not unfrequently stated to be from places they never inhabited. The result of this wretched system is that the productions of some of the most frequently visited and most interesting islands on the globe are still very imperfectly known, while their native plants and animals are being yearly exterminated . . .” (Wallace, 1880, p. 7).

Nesse sentido, destaco os trabalhos de quatro destes grandes pesquisadores que semearam a ecologia na academia e pertencem à primeira geração de ecólogos *sensu stricto* da história. São eles: Henry C. Cowles, Frederic E. Clements, Stephen A. Forbes e Charles C. Adams.

Para entender com clareza a linha de pesquisa destes ecólogos, devo, primeiro, introduzir as ideias propostas por Herbert Spencer, outro pensador e filósofo extremamente influente na sociedade britânica na segunda metade do século XIX (Pearson, 1900; Kingsland, 1985; McIntosh, 1985). Spencer propôs uma visão holística de natureza, na qual buscou encontrar leis gerais para explicar a transformação da matéria, orgânica e inorgânica, por meios não miraculosos ou divinos. Para ele, todos os fenômenos naturais poderiam ser entendidos em termos de um balanço entre forças que atuam sobre a matéria e que são regidas por dois grandes processos, evolução (*i.e.* integração de matéria e consequente dissipação de movimento) e seu oposto dissolução (*i.e.* absorção de movimento e desintegração de matéria) (Kingsland, 1985). O conceito de evolução caracterizou fortemente a filosofia de Spencer, contudo ele desenvolveu uma linha de pensamento bem distinta se comparada à de Darwin, embora reconhecesse diversos aspectos isolados da teoria de seleção natural. Ademais, a semelhança entre a perspectiva de Spencer e princípios termodinâmicos e de mecânica clássica sugerem enganosamente que sua teoria segue o rigor da física na definição de conceitos e processos. A teoria de Spencer é baseada apenas em poucas evidências qualitativas para sustentá-la. No entanto, ela levantou três noções que estimularam genuinamente o pensamento dos ecólogos estadunidenses: i) a de sistemas dinâmicos tendendo ao equilíbrio (de certa forma, já adotada pelos darwinistas como mencionado na seção anterior; veja enunciado de Wallace descrevendo o darwinismo), ii) a de *trade-offs* na alocação de recursos e energia em um organismo e iii) de que os processos que ocorrem nas partes de um sistema são aspectos dos mesmos processos evolutivos que ocorrem no sistema como um todo, ou seja, a noção holística de que toda mudança no sistema causada pelas suas partes afetam a evolução das próprias partes (Kingsland, 1985).

A filosofia de Spencer influenciou profundamente a visão ecológica de Clements, o que pode ser constatado em sua teoria orgânica de sucessão de comunidades (McIntosh, 1985). A noção de sucessão de comunidades já era conhecida por Cowles, que transformou a ecologia em “*um estudo sobre dinâmicas*” ao empenhar-se em estudar as leis que governam as mudanças na estrutura de comunidades plantas (McIntosh, 1980, p. 208). Cowles adotou uma visão fisiográfica no estudo da dinâmica sucessional (*i.e.* calcada na visão de comunidades como formações ou associações descritas por atributos ou pela composição de suas espécies, e que variam em relação às mudanças ambientais que ocorrem ao longo de

ciclos geológicos). Embora tenha influenciado Clements, a perspectiva de Cowles é distinta da concepção holística de sucessão do primeiro (McIntosh, 1980, 1985). Para Clements, a sucessão ecológica de comunidades de plantas deveria ser vista de modo análogo à sucessão de estágios do desenvolvimento de um organismo. Portanto, as comunidades de plantas se transformariam em uma sucessão progressiva de estágios com tendência a um equilíbrio final, começando por plantas pioneiras e seguindo por estágios com fisionomias intermediárias até atingirem uma comunidade *climax*, como as florestas, no equilíbrio (Clements, 1916). Apesar de proposta de Clements ter sido duramente criticada, em conjunto com a proposta de Cowles, ambas podem ser consideradas como as primeiras teorias ecológicas que levam em conta aspectos dinâmicos dos fenômenos naturais.

Apesar de ter se iniciado no âmbito da ecologia vegetal, foi na ecologia animal que o estudo de sistemas dinâmicos em equilíbrio ganhou uma teorização mais robusta. Na década de 1880, Stephen A. Forbes iniciou uma linha de pesquisa que visou encontrar leis que pudessem descrever e elucidar como o balanço da natureza era mantido. Basicamente, Forbes uniu as duas principais propostas teóricas de seu tempo, *i.e.* a de Darwin e a de Spencer, para tentar esclarecer como um balanço harmônico entre as diversas espécies de uma comunidade poderia ser mantido (Kingsland, 1985). Em uma natureza darwiniana, onde a luta pela existência impera, Forbes encontrou em Spencer o elo teórico necessário para compreender este balanço e tratou a questão como um problema de balanço entre forças antagônicas que de um lado favorece a reprodução dos organismos, mas de outro elimina-os do ambiente ao conduzi-los à morte. A influência de Spencer também fica nítida pela visão econômico-holística da ecologia, e portanto, do balanço da natureza, implementada por Forbes em seus estudos. Com uma excelente formação em entomologia e limnologia, Forbes logo se dá conta que as interações, em especial as tróficas, desempenham um papel crucial na regulação deste balanço da natureza. Em seu artigo mais conhecido *The lake as a microcosm*, ele evoca a noção de exclusão competitiva ao concluir que a competição por recursos alimentares levariam algumas espécies aquáticas a eliminarem seus competidores mais fracos, isto é, aqueles menos eficientes ou ajustados em extrair seus recursos vitais do ambiente (Forbes, 1925). Forbes chega a essa conclusão por meio de uma analogia com as sociedades humanas em que “*o homem de negócios frugal, que vive em acordo com sua renda, (desapossa) seu competidor incapaz, o qual nunca (consegue) pagar seus débitos*” (Forbes, 1925, p. 549-550). Portanto, Forbes propõe que a luta pela existência conduzirá as populações de uma espécie a um estado de equilíbrio.

Além da competição inter-específica, Forbes reconhece nas interações de predadores com suas

presas um importante mecanismo regulatório do balanço da natureza, em que o crescimento dos predadores é limitado pela quantidade de presas, as quais ajustam suas taxas reprodutivas reciprocamente a fim manterem-se no ambiente. Com isso, ele introduziu a noção de flutuações cíclicas nas abundâncias das espécies em decorrência de interações predador-presa (McIntosh, 1980), um fenômeno natural que foi melhor descrito anos mais tarde por Charles Elton (Elton, 1924) e que, após sua formalização matemática por Alfred J. Lotka e Vito Volterra em 1925 (Lotka, 1925; Volterra, 1926), se tornou um dos conceitos mais importantes da ecologia, como será visto em breve. Este conceito foi trabalhado por Forbes dentro de uma perspectiva econômica e baseada no holismo de Spencer. Do ponto de vista econômico, estudar as interações de predação seriam úteis, por exemplo, para o manejo de pragas agrícolas, uma vez que pássaros seriam responsáveis por controlar as populações de insetos herbívoros (Kingsland, 1985). Isso remete ao ponto de vista holístico do ecólogo norte-americano, pelo qual a espécie humana deveria ser tratada como parte integrante da natureza, portanto regida pelas mesmas leis e processos naturais que qualquer outra espécie, mas também afetando estes mesmos processos em decorrência de sua própria luta pela existência. Desta forma, caberia ao homem interferir para manter um equilíbrio *adequado* da natureza, evitando flutuações drásticas na densidade de espécies de interesse econômico e assim, poupar os cofres públicos ao evitar gastos de recursos desnecessários para o controle de pestes (Kingsland, 1985).

As ideias de equilíbrio e economia da natureza de Forbes mudaram substancialmente o destino da ecologia. Estas ideias influenciaram também Charles C. Adams, um ecólogo de animais que se lança na primeira tentativa de organizar o conhecimento ecológico até então disponível em uma teoria fundamentada nos aspectos dinâmicos da natureza decorrentes das interações entre as espécies de uma comunidade. Em 1915, este pesquisador, junto com Cowles, Forbes e outros 47 ecólogos de animais e de plantas, fundam a Sociedade de Ecologia da América (ESA), institucionalizando a ecologia nos Estados Unidos <sup>11</sup> e, assim, consolidando-a no meio acadêmico (McIntosh, 1985). Um dos aspectos mais importantes de Adams foi ele ter destacado a relevância da quantificação dos fatos e padrões ecológicos e disseminado o uso de métodos experimentais na prática ecológica (Adams, 1913; Kingsland, 1985). Sua visão de equilíbrio remete à de Spencer, contudo é diretamente alinhada com a teoria desenvolvida na

---

<sup>11</sup>Vale destacar que a sociedade britânica de ecologia (BES), já havia sido fundada dois anos antes por um grupo majoritariamente de ecólogos de plantas. A ecologia animal só ganha a devida notoriedade na sociedade britânica no final da década de 1920, simbolizado pela publicação do primeiro volume do *Journal of Animal Ecology* editada por Charles Elton em 1933 (McIntosh, 1985).

físico-química, mais precisamente na termodinâmica. Adams concebia a natureza como um sistema de fluxo energético em que as espécies seriam transformadores da energia do sistema e as interações entre os organismos de uma comunidade seriam processos que regulam a dinâmica de equilíbrio deste sistema. Ao focar nos processos e em uma visão sistêmica da natureza, Adams teve a intenção de incorporar a visão científica moderna à ecologia, em que teorias são baseadas em hipóteses que podem ser testadas experimentalmente (Kingsland, 1985). Todavia, o pensamento sistêmico de Adams, assim como os *princípios* de Spencer, dependia de maior rigor científico para se firmar entre os ecólogos, algo que só viria a se materializar em 1925, quando a obra de Alfred J. Lotka proveu os elementos necessários para a formalização de uma teoria geral de sistemas ecológicos dinâmicos.

### 1.2.3 O amadurecimento teórico da ecologia

Na década de 1920, o interesse científico por questões ecológicas proliferou intensamente, culminando com a primeira tentativa de formalização de uma teoria coerente e coesa para esta disciplina. O sucesso deste movimento de teorização deveu-se ao interesse genuíno de físicos e matemáticos, como Alfred J. Lotka e Vito Volterra, mas, fundamentalmente, à figura emblemática do biólogo Raymond Pearl, nas questões ecológicas relacionadas ao equilíbrio de sistemas dinâmicos. Pearl possuía um interesse muito vasto dentro da biologia e um apreço especial pelo uso de abordagens experimentais na investigação científica. No começo do século XX, ele se interessou em aplicar métodos estatísticos em problemas biológicos e passou um ano na Inglaterra como visitante no laboratório de Pearson (Jennings, 1942).

A aproximação com Pearson talvez tenha instigado Pearl a investigar questões da biologia humana. A partir da década de 1920, Pearl desenvolveu uma linha de pesquisa centrada no estudo da ecologia de seres humanos e, assim, passou a se dedicar ao campo da demografia (Kingsland, 1985). Provavelmente, um de seus trabalhos mais polêmicos seja um com Reed (Pearl e Reed, 1920), em que formalizou matematicamente o velho problema de explosão demográfica levantado por Thomas Malthus. A solução matemática apresentada por Pearl foi a curva logística, a qual já havia sido deduzida pelo matemático Verhulst muitos anos antes (Bacaër, 2011). A fatalidade de Pearl foi taxar a curva logística como uma lei geral da biologia e afirmar que, por meio dela, poderia extrapolar o tamanho populacional dos Estados Unidos em seu equilíbrio demográfico. Este tema será melhor explorado no capítulo 3, mas devo deixar claro neste momento que um dos principais motivos da polêmica em torno da curva logística foi a aversão à matemática por grande parte dos ecólogos, gerando críticas calorosas e muitas vezes

embasadas em argumentações infundadas sobre o papel de modelos na construção de uma teoria.

Além de um polêmico biólogo, Pearl foi um exímio articulador e propagandista (Jennings, 1942), que possuía *olhos de águia*<sup>12</sup> para identificar pesquisadores desconhecidos que tinham ideias inovadoras e destacá-los no cenário acadêmico, como foi o caso de Lotka e do russo Georgii Gause. Pearl enxergou um enorme potencial para a fundamentação de uma teoria geral para a ecologia nos estudos biofísicos de Lotka. Embora possuísse formação em física, as grandes questões de Lotka eram multidisciplinares e uma de suas principais metas foi propor um programa de pesquisa para um ramo do conhecimento que denominou biologia física (*physical biology*), o qual incluiria todos os ramos das ciências naturais, da física à biologia (cf. Lotka, 1925, p. 53). Contudo, foi no campo da modelagem de sistemas dinâmicos que os trabalhos de Lotka ganharam notoriedade entre os ecólogos. Sua visão sistêmica foi influenciada pela de Spencer (Kingsland, 1985), porém Lotka introduz efetivamente o modo de pensar de um físico, com uma conceitualização mais rigorosa dos termos e usando as propriedades matemáticas do cálculo diferencial para demonstrar seus pontos. Ao fazer uma analogia de casos biológicos com sistemas físico-químicos de reações de partículas, ele desenvolveu um sistema de equações diferenciais para modelar a dinâmica de espécies interagentes, como por exemplo, presas e predadores. Uma das predições mais contundentes de seu modelo é a ocorrência de flutuações cíclicas nas densidades populacionais das espécies. Porém a vivência de Lotka no campo da biologia era ínfima, o que causou sérias dificuldades para ele comunicar amplamente sua pesquisa (Kingsland, 1985). O modelo de Lotka se tornou um clássico da ecologia de populações porque Pearl soube fazer sua propaganda (Kingsland, 1985) e, principalmente, porque Vito Volterra, um matemático italiano com uma habilidade formidável em expressar com clareza suas ideias no campo ecológico, desenvolvera independentemente as mesmas equações ao estudar um problema de variações populacionais de estoques pesqueiros do Mar Adriático, depois da Primeira Guerra Mundial (Volterra, 1926).

Os modelos de Pearl, Lotka e Volterra chamaram a atenção para o nível de população no estudo de problemas dinâmicos em ecologia. Além disso, a abordagem matemática que adotaram nestes trabalhos foi bem recebida por aqueles, como Forbes, Adams e o ecólogo inglês Charles Elton, interessados em conciliar teoria, experimentação e observação da natureza em campo. Elton possuía uma forte inclinação empírico-quantitativa e iniciou uma linha de pesquisa focada na descrição de como as redes tróficas de uma comunidade eram estruturadas em termos de fluxo energético e de biomassa (Elton, 1927), mas,

---

<sup>12</sup>Característica atribuída a Pearl por Kingsland (1985, p. 29).

como mencionado anteriormente, este ecólogo já havia se deparado com os problemas de flutuações populacionais ao estudar a dinâmica interativa entre lebres e linces. Elton atribuiu suas observações a fatores ambientais, como clima e ciclos sazonais (Elton, 1924) e, apesar de não ter usado muita matemática em seus trabalhos, tampouco tenha desenvolvido modelos de sistemas dinâmicos, recebeu com bastante entusiasmo o modelo de Lotka e de Volterra, pois com ele foi possível demonstrar que flutuações populacionais poderiam decorrer de um outro mecanismo, *i.e.* da simples interação entre as presas e seus predadores.

O período entre 1920 e 1950 também marcou um aprimoramento do uso da matemática na ecologia vegetal, porém de uma forma muito distinta daquela aplicada entre os ecólogos de animais. Desde os primórdios da ecologia vegetal, os ecólogos de plantas adotaram uma abordagem quantitativa para descrever os padrões das comunidades investigadas, seja em termos fisiográficos, seja em termos de raridade das espécies (McIntosh, 1985). Estes ecólogos se preocuparam em padronizar suas coletas de dados e já no fim do século XIX usavam o método de parcelas em seus censos, o qual consiste em quantificar os atributos de interesse das comunidades em uma área pré-delimitada (Pound e Clements, 1898). Claramente, a ecologia vegetal rumou para a trilha dos estudos que procuraram descrever padrões estáticos das comunidades sem a preocupação de modelar a dinâmica temporal dessas comunidades. Turchin (1998, p. 1, referindo-se ao estudo de Pielou, 1977) comentou que “*modelos de dinâmica de populações de animais tradicionalmente se focaram na flutuação temporal em abundância*” enquanto que “*modelos estatísticos para o estudo de populações de plantas tem tradicionalmente focado na distribuição [espacial]*” dos indivíduos. Um dos principais problemas da ecologia vegetal no início do século XX, foi compreender como os padrões das comunidades eram afetados pelo tamanho da parcela utilizada na amostragem (*e.g.* McIntosh, 1985; Pielou, 1966). A matemática usada na análise desses problemas foi mais simples que aquela de Lotka e Volterra, que fazem uso de equações diferenciais. Gleason, por exemplo, foi um dos primeiros a buscar um entendimento sobre padrões espaciais de distribuição das espécies de plantas em uma comunidade e a usar distribuições probabilísticas em sua análise (McIntosh, 1985). Como resultado de seus estudos, Gleason mostrou que esta distribuição espacial, dependendo do tamanho e da quantidade de parcelas amostradas, não seria obrigatoriamente aleatória, mas agregada (Gleason, 1920).

No final da primeira metade do século XX, a necessidade de organização teórica da ecologia atingiu seu ápice. Apesar de todo avanço observado até o momento, a ecologia ainda não possuía uma teoria geral, como era nítido em outras áreas das ciências como a física (Kingsland, 1985). George Evelyn



Hutchinson, considerado por muitos o *pai* ou o *inventor* da ecologia moderna (Slobodkin e Slack, 1999, *cf.*), liderou, enfim, um movimento responsável pela maior revolução do pensamento ecológico desde a segunda metade do século XX. Influenciado pelos estudos experimentais de Gause (1934) demonstrando o princípio da exclusão competitiva em protozoários e após anos de dedicação ao estudo limnológico em lagos europeus, Hutchinson se intriga com o que se tornou o problema central da ecologia (*cf.* Hutchinson, 1959): como é possível existir tanta diversidade num mundo onde a exclusão competitiva atuaria eliminando espécies? Este brilhante limnólogo parecia não ter restrições à matematização de problemas ecológicos e resolveu este problema propondo o seu conceito de nicho hiperdimensional, em que cada fator que afeta a existência de uma espécie é representado por uma dimensão no espaço de nicho (Hutchinson, 1957). O volume formado pelas condições ambientais que permitem a existência em que uma dada espécie define o nicho fundamental desta espécie enquanto que a redução deste hipervolume decorrente da competição com outras espécies foi denominada de nicho realizado. Portanto, variações entre os nichos realizados das espécies poderiam explicar suas coexistência em uma mesma área. Com isso, Hutchinson levanta a ideia de que a competição inter-específica seria o principal processo estruturador de comunidades.

Com um estilo de escrita muito claro e atrativo, suas ideias começaram a se espalhar não somente entre os ecólogos. No final dos anos de 1950, Hutchinson se associou com o *gênio* matemático Robert Helmer MacArthur e os frutos desta parceria mudaram definitivamente os rumos da ecologia (Kingsland, 1985). Em sua obra, MacArthur usou o raciocínio abstrato da matemática com maestria, algo indispensável para que ele pudesse colocar em prática seu programa de pesquisa. Resumidamente, este programa consistiu em desenvolver e analisar modelos que dessem conta de explicar a coexistência das espécies em situações de equilíbrio. O programa de pesquisa de MacArthur claramente era focado em usar o raciocínio dos físicos para conceber e analisar os seus sistemas de interesse. Este matemático fez questão de enfatizar e disseminar esta lógica de estudo de sistemas dinâmicos em que a formulação dos modelos deveria ser tão simplificada quanto possível, a fim de que apenas as propriedades relevantes fossem incluídas, eliminando, assim, complicações desnecessárias que só tornariam a análise do modelo mais difícil. Usando as palavras do próprio matemático, devemos procurar os *crístais perfeitos* da natureza ao buscarmos respostas gerais para os fenômenos ecológicos (MacArthur, 1972). Nesse sentido, seu programa de pesquisa não contemplava processos históricos da evolução das espécies, tampouco contemplava qualquer tipo de contingência. Como bem colocado por Kingsland (1985), a abordagem de MacArthur e Hutchinson eclipsou a história.

Com esse programa de pesquisa, MacArthur mostrou ser prolífico ao publicar muitos outros artigos que influenciaram sobremaneira os teóricos nas décadas de 1960 e 1970 (e.g. MacArthur, 1957, em que apresenta seu famoso modelo *broken stick* de distribuição de abundâncias relativas em aves e MacArthur e Wilson, 1963, no qual desenvolve uma teoria de equilíbrio para a biogeografia de ilhas). No contexto da teoria competitiva, o exemplo que melhor ilustra o poder abstrativo de MacArthur e sua capacidade de simplificar seus sistemas de estudo foi sua teoria de partição de recursos entre espécies congênicas (MacArthur, 1958). Sua intenção com esta teoria foi “*determinar os fatores que controlam as abundâncias da espécies e previnem que todas menos uma seja exterminada por competição*” (p. 599). Sua ideia foi simples. MacArthur percebeu que cinco espécies de aves congênicas (*Dendroica*), que reconhecidamente possuem requerimentos alimentares e ecológicos muito similares, podiam ser encontradas em abundância nas florestas de coníferas norte-americanas em determinadas épocas do ano. Essa constatação era bastante intrigante à luz da teoria competitiva de nicho, pois aparentemente contrariava as expectativas desta teoria. Entretanto, MacArthur era um exímio conhecedor dessas aves e logo se deu conta de que o que estava ocorrendo é que as espécies estavam partilhando os recursos ao forragearem em estratos específicos dos pinheiros. MacArthur fez uma descrição excepcional do comportamento das cinco espécies de *Dendroica* e por meio deste seu modelo conceitual muito simples de partição de recursos, este matemático conseguiu mostrar que realmente as cinco espécies partilhavam diferentemente os recursos de uma mesma árvore. Por exemplo, *Dendroica tigrina* forrageia a maior parte do tempo em ramos mais elevados, enquanto que *Dendroica virens* forrageia mais na base dos pinheiros. Com o estudo acima, MacArthur considerou ter corroborado a teoria competitiva ao alegar que a partição de recurso se dá como uma *estratégia* para evitar a intensidade competitiva, promovendo, desta forma, a coexistência de espécies similares em uma mesma região. Em outras palavras, a competição seria uma força fundamental estruturando as comunidades ecológicas. Este seu estudo, sem dúvida, colocou a teoria de nicho de Hutchinson em um novo patamar, mudando os rumos teóricos da ecologia.

### *O resgate da história*

O pensamento ecológico, especialmente no âmbito teórico, foi dominado por 20 anos pela escola de Hutchinson e MacArthur, até que críticas profundas a esta escola de pensamento começaram a ser desferidas no final da década de 1970, gerando grandes controvérsias que, novamente, derivaram em impetuosos conflitos (Peters, 1976; Simberloff, 1983; Cooper, 2003). Dentre as diversas vozes que criticaram a visão

MacArthur-Hutchinsoniana, a de Daniel Simberloff certamente foi das mais fortes na promoção de um contra-movimento intelectual na ecologia. Simberloff atacou duramente o status de lei geral da ecologia que o programa de pesquisa MacArthur-Hutchinsoniano concedeu à afirmação de que a competição inter-específica atua como o principal processo estruturador dos padrões de diversidade em comunidades biológicas. Em linhas gerais, a crítica de Simberloff a esta teoria é estruturada em quatro pontos (Simberloff, 1980, 1982; Connor e Simberloff, 1986): i) a literatura é extremamente controversa em prover evidências empíricas que a confirmem; ii) ela é fundamentada em modelos com premissas irreais, cujas previsões não podem ser devidamente operacionalizadas empiricamente pela dificuldade em se medir os parâmetros desses modelos. Portanto, a teoria não pode ser efetivamente falseada e testada experimentalmente; iii) outros processos de natureza idiossincrática ou histórica podem afetar os resultados da competição, mas não são levados em conta nos modelos propostos pelos adeptos da escola MacArthur-Hutchinsoniana; iv) a importância do acaso gerando os padrões observados na natureza é negligenciada a favor de uma visão de mundo mecanístico-determinística. Sobretudo, a argumentação de Simberloff se baseia em uma crítica brutal ao modo mecanístico de se estudar a ecologia de comunidades tal qual proposto por MacArthur. Em contrapartida, advoga a favor de formulações teóricas com domínios de aplicação mais locais em detrimento de uma teorização geral baseada em conceitos irreais, abstratos, não observáveis ou operacionalizáveis, como o de competição inter-específica (Simberloff, 2004).

As críticas à escola hutchinsoniana ampliaram durante a década de 1980, porém manifestaram-se em um movimento que não pode ser caracterizado por uma linha única de oposição e de alternativas ao paradigma de nicho (Strong et al., 1984). Além da perspectiva de Simberloff, outros dois pontos de vista que se destacaram foram os de Robert Ricklefs e James Brown. O primeiro, enfatizou a questão dos processos históricos regulando a riqueza de comunidades ao sugerir que o *pool* regional de espécies pode afetar a riqueza de um local (Ricklefs, 1987). Já o segundo, advogou a favor de uma abordagem macroecológica e de uma ciência observacional, necessária para descrever padrões históricos e biogeográficos (Brown, 1995). Essa discussão culminou, no final da década de 1990, com a visão radical de John Lawton, a qual ficou conhecida pela expressão “a ecologia de comunidades é uma bagunça”<sup>13</sup> (Lawton, 1999, p. 178). Embora a proposta de Lawton não seja a mais rigorosa ou bem fundamentada no assunto (El-Hani, 2006), seu artigo foi bastante debatido entre os ecólogos, haja visto o alto número de citações de seu artigo (676, de acordo com o SCOPUS). Para Lawton, não há processos preponderantes

---

<sup>13</sup>Da expressão em inglês: “*community ecology is a mess*”

estruturando os padrões de comunidades visto que muitos mecanismos podem gerar o mesmo padrão geral. Ademais, Lawton enfatiza o fato da ecologia ser uma ciência de contingências, em que fatores históricos e regionais afetam consideravelmente as comunidades de um local (Ricklefs, 1987). Para este ecólogo a solução seria esquecer a visão focada em modelos mecanísticos que buscam por leis gerais que regem a ecologia e se concentrar no estudo de padrões. Em outras palavras, deveríamos abandonar a tradicional ecologia de comunidades e focar na macroecologia, uma asserção que caracteriza um dos únicos pontos em que Simberloff discorda de Lawton (*cf.* Simberloff, 2004).

Apesar da *cladogênese* observada no pensamento e na conduta dos ecólogos, houve alguns pesquisadores que não desistiram da ideia de uma unificação teórica para a ecologia. Por exemplo, Hubbell (2001) propõe a teoria neutra unificada da biodiversidade e biogeografia, que chamou muita atenção da comunidade ecológica desde sua proposição, por juntar importantes conceitos ecológicos como especiação, dispersão e estocasticidade, porém desconsiderando a competição como fator estruturador. Ao mesmo tempo que conquistou muitos adeptos, esta teoria também foi criticada (Dornelas et al., 2006). Recentemente, Roughgarden (2009) retomou o debate sobre uma teoria geral da ecologia, colocando a discussão em torno dos motivos pelos quais a ecologia não conseguiu desenvolver um arcabouço teórico unificado como o da biologia evolutiva, mais especificamente, da genética de populações com sua síntese moderna evolutiva (SME), a qual fora desenvolvida na década de 1940 e considerada mais que uma teoria, mas o paradigma atual da biologia. No ano seguinte, Mark Vellend, baseado na discussão de Roughgarden, propôs uma teoria geral para a ecologia de comunidades fundamentada em quatro classes de processos análogos aos da teoria sintética da evolução: seleção, dispersão (equivalente ao fluxo genético), especiação (equivalente à mutação) e deriva (Vellend, 2010). A proposta de Vellend talvez seja a mais recente neste debate e se encontra em discussão atualmente. No entanto, pode-se dizer que ainda estamos sem uma resposta satisfatória para este problema fundamental da epistemologia ecológica.

#### **1.2.4 Alguns limites da modelagem matemática**

Para finalizar essa longa história, devo apresentar uma última fonte mais recente de controvérsia, referente ao uso de modelos de simulação computacional em estudos ecológicos. Como procurei mostrar até aqui, a formulação de problemas que envolvem a análise de sistemas dinâmicos por meio de modelos matemáticos atraiu a atenção de muitos ecólogos importantes. No entanto, a possibilidade dos problemas teóricos em biologia serem resolvidos efetiva e exclusivamente pela matemática tradicional foi, e

continua sendo, criticada por uma parcela de pesquisadores (Grimm, 1994). Os críticos da matemática podem ser divididos em dois grupos principais. Primeiro, estão aqueles que desvalorizam a matemática simplesmente por uma aversão psicológica a números e cálculos simbólicos (Fawcett e Higginson, 2012, provêm uma análise interessante do assunto). Entretanto, meu interesse principal nesta tese está na crítica referente ao reconhecimento das limitações que a abordagem matemática possui quando análises de dinâmicas mais complicadas são requeridas para se resolver um problema em mãos. Uma discussão mais aprofundada sobre essa crítica será o tema do capítulo 3 desta tese. Aqui, minha intenção é apenas introduzir o debate mostrando alguns pontos gerais que estão em jogo na discussão.

A abordagem de modelagem fundamentada em modelos algorítmicos de simulação computacional<sup>14</sup> ganhou uma estrutura coesa e começou a se disseminar na ecologia na transição dos séculos XX e XXI (Grimm, 1999). Com o desenvolvimento tecnológico, este tipo de modelagem se tornou acessível a qualquer um que disponha de um computador pessoal. De acordo com os proponentes desta abordagem (DeAngelis e Mooij, 2005; Grimm e Railsback, 2005), simulações computacionais permitiram ao modelador adotar premissas mais *realistas* a respeito da dinâmica dos sistemas modelados. Esta abordagem possibilita a modelagem dos fenômenos ecológicos com base no comportamento dos indivíduos que compõe o sistema (*i.e.* modelos baseados no indivíduo<sup>15</sup>). Um dos argumentos usados a favor da modelagem por simulações computacionais baseadas no indivíduo é que os sistemas podem ser estudados na escala em que os processos evolutivos efetivamente ocorrem<sup>16</sup>, portanto os mecanismos detalhados e específicos que afetam as dinâmicas ecológico-evolutivas poderiam ser estudadas com mais precisão (DeAngelis e Mooij, 2005; Grimm e Railsback, 2005). Por exemplo, modelos de simulação constituíram uma parte importante de algumas teorias mais recentes (*e.g.* a teoria de limiares espaciais de extinção Fahrig, 1997; With e King, 1999) ou contribuíram para o aprimoramento de teorias mais antigas (*e.g.* a que lida com os efeitos da denso-dependência na demografia e distribuição espacial de populações (Law et al., 2003)). Entretanto, como qualquer tipo de modelo, simulações computacionais também possuem seus domínios de aplicação e, portanto, limitações. Mais uma vez, essas limitações motivam um debate

---

<sup>14</sup>Esta abordagem assim como a modelagem matemática por equações diferenciais serão descritas apropriadamente no capítulo 3, em que a disputa introduzida nesta seção será aprofundada.

<sup>15</sup>Em oposição a uma visão baseada em campo-médio ou como Getz (2013) sugere, em uma perspectiva baseada na modelagem de dinâmica de *agregados* (*i.e.* “*lumped dynamic models*”), como é o caso da modelagem por equações diferenciais, em que as variáveis de estado descrevem a população e não as unidades que a compõe.

<sup>16</sup>Um argumento um tanto capcioso, a meu ver, pois a discussão do nível em que os processos evolutivos ocorrem é (ou foi, na perspectiva de muitos cientistas) um dos grandes debates controversos da biologia.

controverso, muito mais implícito na literatura (porém não menos importante), se comparado com o debate referente à teoria de competição (isso ficará claro no capítulo 3; por enquanto, espero que o leitor possa aceitar esta alegação como um premissa). Portanto, finalizo este panorama histórico concluindo que controvérsias são frequentes na ecologia, porém diversas delas promovem debates equivocadamente conflituosos. Procurarei explicitar esta minha afirmação ao longo desta tese.

### 1.3 Pluralismo epistemológico e o futuro da ecologia

Como venho mostrando, a história da ecologia é repleta de controvérsias relacionadas aos seus fundamentos, levando alguns pesquisadores a duvidarem da legitimidade científica desta área do conhecimento ou, ao menos, desconfiarem de sua capacidade de elucidar os fenômenos naturais (Peters, 1976; Murray Jr., 2001). Algo inicialmente esperado para um disciplina científica jovem buscando a maturidade, se transformou numa grande confusão epistemológica que gera desconforto a qualquer um que dedique um mínimo de atenção a esse aspecto de ordem filosófica, principalmente àqueles em começo de carreira, como estudantes de graduação e pós-graduação. Em meio a essa atmosfera nebulosa, alguém que nunca se debruçou, ou que começa a se debruçar, sobre esses problemas filosóficos passa, inevitavelmente, a se fazer questões muito elementares, como por exemplo: afinal, o que é conhecimento? O que é teoria e qual sua utilidade? Enfim, o que conta e o que não conta como explicação de um fenômeno ecológico? Materializando essa problemática, Cooper (2003) apontou três tópicos que sumarizam as controvérsias fundamentais da ecologia teórica no século XX:

**Generalidade** - Existem leis gerais em ecologia ou esta é uma ciência de contingências? Quão generalizável é o conhecimento ecológico?

**Equilíbrio** - existe um balanço da natureza? Os sistemas ecológicos tendem a apresentar um equilíbrio estável como estado final? Se os sistemas ecológicos tendem a um equilíbrio, há algum tipo de interação que desempenha um papel dominante na estabilização de dinâmicas desses sistemas?

**Modelagem** - Qual é o papel de modelos na ecologia? É possível modelar processos e sistemas ecológicos? Caso a resposta seja afirmativa, existem múltiplas estratégias de modelagem para se alcançar um determinado conhecimento ecológico ou estamos limitados a apenas uma abordagem correta?

Respostas para estas questões estão longe de serem satisfatórias, portanto muitos ecólogos sentem-se compelidos a se engajarem nesta arena epistemológica, como faço neste manuscrito.

Minha tese é a de que muito dos conflitos envolvendo as controvérsias acima mencionadas são infundados, uma vez que qualquer episteme usada na resolução de um dado problema científico possui propriedades relevantes, mas também limitações. Geralmente, nenhuma episteme particular se mostra suficientemente apropriada como único e *correto* meio para se atacar um problema de interesse ecológico. Além disso, uma análise histórica simples, como a que apresentei aqui, revela a origem e desenvolvimento polimórfico da ecologia, que por sua vez, levou à formação de diferentes escolas de pensamento, com problemas e modos de resolução particulares. Neste contexto, considero que haja bastante espaço para acordos entre pesquisadores. Nesta tese, procurarei mostrar que tratar diferenças epistêmicas de maneira conflituosa reflete, no mínimo, uma visão restrita sobre o papel da teoria na ciência e uma falta de conhecimento sobre o que se pode ou não inferir a partir da adoção de um determinado método. Isso sem dúvida atravanca o avanço teórico-empírico em ecologia. Portanto, defenderei que a busca pelo pluralismo epistemológico, visando, quando possível, a conciliação ou acordos entre perspectivas distintas e aparentemente conflitantes, é um caminho recomendável para fazer a teoria ecológica avançar.

Embora a noção de pluralismo epistemológico seja recente, especialmente na literatura ecológica, muito já se discutiu sobre o tema (McIntosh, 1987; Feyerabend, 1993; Almeida, 1999; Keller, 2003). O conceito de pluralismo que adotarei deriva de noções discutidas pelos autores supracitados, em especial a de Evelyn Keller. Em linhas bem gerais, parto da perspectiva de que a ciência é uma concepção social dependente dos acordos que os envolvidos na produção científica fazem entre si. Nesse sentido, este conceito absorve a noção de culturas epistemológicas distintas proposta por Keller (2003), que considera o processo de conhecimento contingente à história e às normas estabelecidas ao longo do desenvolvimento das diferentes disciplinas científicas que visam a compreensão de um dado fenômeno ou objeto.

Seria impossível abordar todas as controvérsias e conflitos epistemológicos da ecologia em uma simples tese de doutorado. Por isso, concentrarei minha atenção no primeiro e no último tópico controverso levantado por Cooper (2003), *i.e.* generalizações ecológicas e estratégias de modelagem para o avanço de conhecimento em ecologia. A meu ver, questões relativas ao conceito de equilíbrio recaem no campo da metafísica, algo que está fora do escopo desta tese. Entretanto, devo notar que a noção de equilíbrio será eventualmente levantada ao longo da tese, uma vez que os três tópicos de Cooper se sobre-

põem. Para atingir esses propósitos, o presente documento foi estruturado em capítulos organizados em ordem crescente de especificidade nos seus objetivos. No capítulo dois, abordarei os problemas amplos e as grandes controvérsias da epistemologia, a fim de apresentar um argumento geral a favor do pluralismo na ciência. No capítulo três, mostrarei um breve panorama das principais abordagens de modelagem usadas na ecologia - a se dizer, modelagem estatística, equacional e algorítmica (*i.e.* por simulações computacionais) - procurando contextualizar a origem das controvérsias e, portanto, dos conflitos epistemológicos observados entre perspectivas distintas. Para isso, definirei alguns conceitos fundamentais relacionados à modelagem de fenômenos ecológicos e procurarei demonstrar como as diferentes abordagens podem ser integradas em um programa de pesquisa. No capítulo quatro, explicitarei minha defesa ao argumento pluralista, fazendo uma síntese geral dos assuntos abordados e apresentando uma proposta epistemológica para um programa de pesquisa em ecologia. Esta proposta leva em conta o pluralismo metodológico e é predisposta a acordos epistêmicos (culturais) como meio de construir um conhecimento integrado e criativo ao invés de rígido e restritivo. Neste sentido, levantarei, ainda que em nível conjectural, a noção de rede complexa de conhecimento como um modelo hipotético de concepção da ciência que talvez auxilie o cientista a entender sua atividade com mais clareza. Recomendo que esta noção seja debatida e explorada mais profundamente em estudos futuros. Finalmente, no último capítulo, exponho minhas considerações finais e as conclusões gerais desta tese, assim como perspectivas futuras que já se encontram em andamento no Laboratório de Ecologia Teórica (LET - USP).

Como consideração final a esta introdução, devo fazer um esclarecimento a respeito do teor filosófico da tese. Revisar dignamente toda a literatura epistemológica em ecologia seria muito pretensioso, além de ser algo que destoaria totalmente do escopo específico desta tese (defender o pluralismo epistemológico e propor possibilidades para a implementação desta filosofia). Diversos autores especializados no assunto já fizeram boas revisões e eu não teria capacidade intelectual para uma empreitada deste porte no momento – por não ser filósofo por formação e não ter sido treinado a escrever sobre filosofia. Ademais, a literatura epistemológica é imensa e composta de longos argumentos para justificar uma variedade enorme de pontos de vista. Mesmo uma versão sintética tomaria um espaço enorme deste documento e certamente tornaria a sua leitura massante, levando-se em conta os pontos centrais que serão discutidos na tese. Portanto, minha intenção será traçar uma linha de raciocínio que se utiliza de argumentos filosóficos não somente para embasar minha perspectiva de cientista e ecólogo dentro das controvérsias que discutirei, mas também para dar coerência à tese como um todo.



## Bibliografia

- Adams, C. 1913. *Guide to the Study of Animal Ecology*. – The Macmillan Company.
- Allee, W., Park, O., Emerson, A., Park, T. e Schmidt, K. 1949. *Principles of animal ecology*. – Saunders Co.
- Almeida, M. 1999. Guerras culturais e relativismo cultural. – *Revista Brasileira de Ciências Sociais* 14(41): 5–14.
- Bacaër, N. 2011. *A Short History of Mathematical Population Dynamics*. – Springer.
- Bateson, W. 1900. Problems of heredity as a subject for horticultural investigation. – *Journal of Horticultural Society* 25: 54–61.
- Brown, J. 1995. *Macroecology*. – *Biology/Ecology*. University of Chicago Press.
- Clements, F. 1916. *Plant Succession: An Analysis of the Development of Vegetation*. – Carnegie Institution of Washington publication. Carnegie Institution of Washington.
- Connor, E. F. e Simberloff, D. 1986. Competition, Scientific Method, and Null Models in Ecology: Because field experiments are difficult to perform, ecologists often rely on evidence that is nonexperimental and that therefore needs to be rigorously evaluated. – *American Scientist* pp. 155–162.
- Cooper, G. 2003. *The Science of the Struggle for Existence: On the Foundations of Ecology*. – Cambridge Studies in Philosophy and Biology. Cambridge University Press.
- Darwin, C. 1859 [1979]. *The Origin of Species*. – Gramercy Books.
- Darwin, C. 1871. Pangenesis. – *Nature* 3: 502–503.
- Darwin, C. e Barlow, N. 1958 [1887]. *The Autobiography of Charles Darwin, 1809-1882: With Original Omissions Restored*. – Norton library. Harcourt, Brace.
- Darwin, C. e Wallace, A. 1858. On the tendency of species to form varieties; and on the perpetuation of varieties and species by natural means of selection.. – *Journal of the proceedings of the Linnean Society of London. Zoology* 3(9): 45–62.
- DeAngelis, D. e Mooij, W. 2005. Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes. – *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 36: 147–168.

- Dornelas, M., Connolly, S. R. e Hughes, T. P. 2006. Coral reef diversity refutes the neutral theory of biodiversity. – *Nature* 440(7080): 80–82.
- El-Hani, C. 2006. Generalizações ecológicas. – *Oecologia Braziliensis* 10(1): 17–68.
- Elton, C. 1927. *Animal Ecology*. – Biology series. The MacMillan Company, NY.
- Elton, C. S. 1924. Periodic Fluctuations in the Numbers of Animals: Their Causes and Effects. – *Journal of Experimental Biology* 2(1): 119–163.
- Fahrig, L. 1997. Relative effects of habitat loss and fragmentation on population extinction. – *The Journal of Wildlife Management* pp. 603–610.
- Fawcett, T. e Higginson, A. 2012. Heavy use of equations impedes communication among biologists. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(29): 11735–11739.
- Feyerabend, P. 1993. *Against method*. – Verso.
- Forbes, S. 1925. *The Lake as a Microcosm*. – *Bulletin (Illinois. Natural History Survey Division)*. publisher not identified.
- Galton, F. 1871. Experiments in pangenesis, by breeding from rabbits of a pure variety, into whose circulation blood taken from other varieties had previously been largely transfused. – *Proceedings of the Royal Society of London* 19(123-129): 393–410.
- 1886. Regression towards mediocrity in hereditary stature.. – *Journal of the Anthropological Institute of Great Britain and Ireland* pp. 246–263.
- Gause, G. 1934. *The struggle for existence*. – Hafner.
- Getz, W. 2013. Computational population biology: Linking the inner and outer worlds of organisms. – *Israel Journal of Ecology and Evolution* 59(1): 2–16.
- Gleason, H. A. 1920. Some applications of the quadrat method. – *Bulletin of the Torrey Botanical Club* pp. 21–33.
- Grimm, V. 1994. Mathematical models and understanding in ecology. – *Ecological Modelling* 75-76(C): 641–651. Cited By 64.

- 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned and what could we learn in the future?. – *Ecological Modelling* 115(2-3): 129–148.
- Grimm, V. e Railsback, S. 2005. *Individual-Based Modeling and Ecology*. – Princeton Paperbacks. Princeton University Press.
- Hubbell, S. 2001. *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography (MPB-32)*. – Monographs in Population Biology. Princeton University Press.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding Remarks. – *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22: 415–427.
- 1959. Homage to Santa Rosalia or why are there so many kinds of animals?. – *American naturalist* pp. 145–159.
- Jennings, H. S. 1942. *Biographical memoir of Raymond Pearl, 1879-1940*. – National Academy of Sciences.
- Keller, E. 2003. *Making Sense of Life*. – Harvard University Press.
- Kingsland, S. 1985. *Modeling Nature: episodes in the history of population ecology*. – Science and Its Conceptual Foundations S. University of Chicago Press.
- Law, R., Murrell, D. J. e Dieckmann, U. 2003. Population growth in space and time: spatial logistic equations. – *Ecology* 84(1): 252–262.
- Lawton, J. 1999. Are there general laws in ecology?. – *Oikos* 84(2): 177–192.
- Lotka, A. 1925. *Elements of Physical Biology*. – Williams & Wilkins Company.
- MacArthur, R. 1972. *Geographical Ecology: Patterns in the Distribution of Species*. – Biology / [Princeton University Press]. Princeton University Press.
- MacArthur, R. H. 1957. On the Relative Abundance of Bird Species. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 43(3): 293–295.
- 1958. Population ecology of some warblers of northeastern coniferous forests. – *Ecology* 39(4): 599–619.
- MacArthur, R. H. e Wilson, E. O. 1963. An equilibrium theory of insular zoogeography. – *Evolution* pp. 373–387.

- McIntosh, R. 1980. The background and some current problems of theoretical ecology. – *Synthese* 43(2): 195–255.
- McIntosh, R. 1985. *The Background of Ecology: Concept and Theory*. – Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press.
- 1987. Pluralism in ecology.. – *Annual review of ecology and systematics* 18: 321–341.
- Murray, B. G. 2000. Universal laws and predictive theory in ecology and evolution. – *Oikos* 89(2): 403–408.
- Murray Jr., B. 2001. Are ecological and evolutionary theories scientific?. – *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 76(2): 255–289.
- Pearl, R. 1914. The service and importance of statistics to biology. – *Quarterly publications of the American Statistical Association* 14(105): 40–48.
- Pearl, R. e Reed, L. J. 1920. On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and its mathematical representation. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 6(6): 275.
- Pearson, K. 1896. *Mathematical Contributions to the Theory of Evolution*. III. Regression, Heredity, and Panmixia. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 187: 253–318.
- Pearson, K. 1900. *The grammar of science*. – Adams and Charles Black.
- 1904. *Mathematical contributions to the theory of evolution*. XII. On a generalised theory of alternative inheritance, with special reference to Mendel's laws. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 203: 53–86.
- Pearson, K., Lee, A. e Bramley-Moore, L. 1899. *Mathematical contributions to the theory of evolution*. VI. Genetic (reproductive) selection: Inheritance of fertility in man, and of fecundity in thoroughbred racehorses. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 192: 257–330.
- Peters, R. H. 1976. Tautology in evolution and ecology. – *The American Naturalist* 110(971): 1–12.

- Pielou, E. C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. – *Journal of theoretical biology* 13: 131–144.
- Pound, R. e Clements, F. 1898. A method of determining the abundance of secondary species. – *Minnesota Botanical Studies* 2: 19–24.
- Ricklefs, R. 1987. Community diversity: Relative roles of local and regional processes. – *Science* 235(4785): 172–176.
- Roughgarden, J. 2009. Is there a general theory of community ecology?. – *Biology and Philosophy* 24(4): 521–529.
- Salsburg, D. 2001. *The Lady Tasting Tea: How Statistics Revolutionized Science in the Twentieth Century*. – Henry Holt and Company.
- Simberloff, D. 1980. Succession of paradigms in ecology: essentialism to materialism and probabilism. – *Synthese* 43(1): 3–39.
- 1982. The status of competition theory in ecology. – *Annales Zoologici Fennici* 19: 241–253.
- 1983. Competition theory, hypothesis-testing, and other community ecological buzzwords. – *American Naturalist* pp. 626–635.
- 2004. Community ecology: is it time to move on?. – *The American Naturalist* 163(6): 787–799.
- Slobodkin, L. e Slack, N. 1999. George Evelyn Hutchinson: 20th-century ecologist. – *Endeavour* 23(1): 24–29.
- Stauffer, R. C. 1957. Haeckel, Darwin, and ecology. – *Quarterly Review of Biology* pp. 138–144.
- Strong, D., Simberloff, D., Abele, L. e Thistle, A. 1984. *Ecological Communities: Conceptual Issues and the Evidence*. – Princeton Legacy Library. Princeton University Press.
- Turchin, P. 1998. *Quantitative Analysis of Movement: Measuring and Modeling Population Redistribution in Animals and Plants*. – Sinauer Associates, Incorporated.
- Vellend, M. 2010. Conceptual synthesis in community ecology. – *Quarterly Review of Biology* 85(2): 183–206.
- Virchow, R. 1860. *Cellular Pathology: As Based Upon Physiological and Pathological Histology*. – John Churchill, New Burlington Street.

- Volterra, V. 1926. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. – *Nature* 118: 558–560.
- Wallace, A. 1880. *Island Life: Or, the Phenomena and Causes of Insular Faunas and Floras, Including a Revision and Attempted Solution of the Problem of Geological Climates.* – Great minds series. University of Chicago Press.
- Wallace, A. 1889. *Darwinism an Exposition of the Theory of Natural Selection with Some of Its Applications.* – Macmillan and Company and New York.
- Wallace, A. R. 1867. Creation by law. – *Quarterly Journal of Science* 4(16): 470–488.
- Weiner, J. 1995. On the practice of ecology. – *Journal of Ecology* pp. 153–158.
- Weismann, A. 1885. The continuity of the germ-plasm as the foundation of a theory of heredity. – *Essays upon heredity and kindred biological problems* 1: 163–254.
- With, K. e King, A. 1999. Extinction thresholds for species in fractal landscapes. – *Conservation Biology* 13(2): 314–326.

## **Capítulo 2**

**Conflitos e disputas em controvérsias epistemológicas: um  
rumo contra-intuitivo para o cientista do século XXI**

A busca pela construção de um arcabouço teórico para a ecologia fez aflorar diversas controvérsias, em grande parte epistêmicas, que culminaram em calorosos debates no final do século XX. Discussões epistemológicas requerem, necessariamente, que nossas atenções se direcionem ao campo da filosofia, o que para muitos cientistas é considerado uma atividade tediosa e irrelevante para o resultado final de sua prática. Entretanto, debates controversos podem ser vistos como uma oportunidade de reflexão filosófica não somente crítica (*i.e.* sobre problemas fundamentais discutidos por nossos pares), mas também auto-crítica; uma reflexão que nos permite reavaliar nossas próprias condutas como cientistas, redefinir o espaço ocupado por nossas pesquisas particulares dentro do campo de conhecimento denominado científico e assim, entender claramente em que aspectos nossos estudos contribuem para o avanço da ciência.

É comum que controvérsias aflorem quando buscamos descrever, definir ou explicar alguma coisa, sejam objetos, ideias ou fenômenos. Controvérsias simplesmente indicam a existência de contradições em como diferentes pessoas entendem um mesmo assunto em pauta ou refletem discordâncias sobre o que é necessário para descrever, definir ou explicar algo. No capítulo anterior procurei mostrar que a disciplina ecologia foi construída de modo fragmentado e em meio a debates controversos os quais, frequentemente, se resolveram na forma de conflitos com nítido tom de disputa ideológica em detrimento de resoluções consensuais entre os envolvidos na discussão. Esta postura conflituosa é bem exemplificada quando observamos os posicionamentos de Bertram G. Murray, Jr. e Robert H. Peters frente a um dos tópicos epistemológicos mais debatidos a partir da segunda metade do século XX: a necessidade nomológica do conhecimento científico. O primeiro adotou um posicionamento mais alinhado a visão tradicional de ciência, derivada da física, ao afirmar que a ecologia “*não é científica porque ela carece de leis universais e uma teoria preditiva*” que ainda não foi capaz de prover (Murray Jr., 2001, p. 255). Peters, por outro lado, argumenta que teorias ecológicas e evolutivas que se baseiem em leis gerais ou universais são tautológicas, por isso não científicas. Isso fica evidente na seguinte afirmação: “*Eu arguo que a ‘teoria da evolução’ não faz previsões ... essas teorias são na realidade tautologias e, como tais, não podem fazer previsões empiricamente testáveis. Elas não são de forma alguma científicas*” (Peters, 1976, p. 1). Para Peters, portanto, a busca por leis universais deveria ser abolida dos programas de pesquisa em ecologia, uma visão compartilhada por muitos outros ecólogos durante os anos 80 e 90.

A discussão sobre o caráter nomológico das ciências é fundamental em meu argumento e será mais aprofundada adiante. Antes disso, parece-me que esta discussão precisa ser colocada num contexto mais



amplo, uma vez que ela evoca uma cadeia de questionamentos que se inicia com a seguinte pergunta: como podemos chegar a uma conclusão definitiva sobre a cientificidade do conhecimento ecológico se a validade científica deste conhecimento pode ser justificada por argumentos tão antagônicos quanto os mencionados no parágrafo anterior? Esta questão retórica nos remete às questões mais básicas e essenciais da epistemologia: afinal, o que é conhecimento e o que é científico? Sem um esclarecimento razoável sobre esses conceitos não é possível estabelecer o que é, portanto, um conhecimento cientificamente válido. Tendo como pano de fundo a controvérsia entre as visões de Peters e Murray, neste capítulo, dedicarei-me a analisar brevemente essa problemática de extrema complexidade para mostrar que uma postura conflituosa pode e deve ser evitada em muitos debates epistemológicos na ecologia.

Durante esta análise, exporei formalmente minha tese de trabalho, na qual defendo a necessidade de adotarmos uma perspectiva pluralista e interepistêmica para que a ciência, em particular a ecologia, possa continuar avançando sem perder coerência. Iniciei com uma reflexão abrangente, procurando mostrar que, em face a um debate controverso, optar por um caminho conflituoso pode ser considerado, no mínimo, contra-intuitivo para alguém que, como eu, fora introduzido somente no século XXI ao universo científico-acadêmico. Como conclusão desta reflexão, deixei evidente as proposições gerais da minha argumentação a favor da tese pluralista interepistêmica na ciência (em específico, na ecologia)<sup>1</sup>.

## 2.1 O que vale como conhecimento científico?

Recorrer à epistemologia para responder o que é um conhecimento científico parece ser a atitude mais intuitiva para um ecólogo que se envolve no assunto, afinal o objeto de estudo de um epistemólogo é justamente entender a natureza do conhecimento, em particular do científico (Godfrey-Smith, 2003). Contudo, este ecólogo certamente se frustrará caso adentre à filosofia com a expectativa ingênua de que ela proverá uma solução definitiva e categórica para o problema. Uma imersão rasa em livros textos dedicados à epistemologia revela não apenas o quão complexo pode ser responder o que é conhecimento e o que é ciência, mas que os próprios filósofos ainda tem muitas dificuldades em definir esses conceitos de maneira concisa e consensual (Salmon, 1989; Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003; Lemos, 2007)

---

<sup>1</sup>Devo notar, que possivelmente as definições de alguns termos usados em minha exposição do problema não terão o mesmo rigor se comparadas com as definições que alguém com formação em filosofia poderia fornecer. Porém, não considero que o texto esteja vago a ponto do leitor ter dificuldade em compreender meu raciocínio.

– e talvez nem seja essa a função de um filósofo. Simplificadamente, pode-se dizer que a epistemologia é movida pelo debate em cima de controvérsias que se originam sempre que alguma proposta de resolução para uma dada questão ou problema em jogo é criticada. A enorme variedade de vertentes ou escolas de pensamento que se originaram em resposta aos problemas epistemológicos pode confundir o cientista que busca um entendimento filosófico de sua atividade e, num primeiro momento, pode ser vista como uma grande barreira a ser transposta. Portanto, concludo esta pequena digressão sobre as expectativas de um ecólogo sobre a filosofia com uma metáfora: o contato com a filosofia não deve se dar almejando o encontro de um porto seguro, mas sim esperando-se uma interminável navegação que busca mares tranquilos, porém que inevitavelmente passa por tormentas. Em consideração a este ambiente intelectualmente complexo, apresentarei minha perspectiva de ecólogo sobre a ciência, reconhecendo componentes da literatura filosófica que me pareceram fundamentais após uma rápida revisão de algumas sínteses epistemológicas, algumas delas apresentada em livros introdutórios de epistemologia (Salmon, 1989; Gewandzajder, 1989; Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003; Lemos, 2007).

Definir o que é conhecimento talvez seja uma das questões mais antigas que os filósofos vem se propondo a resolver (Lemos, 2007). Este termo pode ser usado de formas variadas pelo senso comum, desde quando se diz que “Jorge tem conhecimento que Renan é corrupto e sonegador de impostos” até quando se diz que “Jorge conhece o presidente do senado brasileiro” (no sentido de que Jorge já fora apresentado pessoalmente a este presidente) ou que “Jorge tem o conhecimento de como sambar” ao se referir que Jorge, embora nunca tenha sambado, sabe um conjunto de regras que o permitiriam sambar. Estes usos do termo *conhecimento* tem sentidos claramente distintos, sendo que é predominantemente em cima do primeiro exemplo, classificado como *conhecimento propositivo*, que os epistemólogos dedicam seus esforços intelectuais. Segundo Lemos (2007), um conhecimento propositivo pode ser definido, em linhas gerais, como uma crença verdadeira epistemologicamente justificada. Essa definição ainda é muito simplificada (*cf.* Lemos, 2007, para uma discussão introdutória sobre conhecimento propositivo), mas ela pode ser decomposta em dois elementos que serão suficientes para eu desenvolver a noção do que considero conhecimento cientificamente válido.

O primeiro elemento da definição de Lemos é a noção de crença verdadeira, que embora seja tema de uma vasta quantidade de estudos e controvérsias filosóficas, é um assunto extremamente complicado e discutí-lo em profundidade foge do escopo de minha tese. Neste momento, admitamos apenas que uma crença é uma relação entre um sujeito e uma proposição, em que este sujeito admite a possibilidade da

proposição *e.g.* retomando o exemplo acima, Jorge crê na possibilidade de Renan ser corrupto). Quanto à noção de verdade, mais complicada que a de crença, consideremos que uma proposição verdadeira seja aquela que corresponde a como o mundo é de fato, *i.e.* a crença de Jorge só poderá ser verdadeira se Renan for, de fato, corrupto. Esta definição de verdade está sujeita a várias críticas, visto que ela deixa em aberto se e como poderíamos determinar o que são os fatos do mundo. Poderíamos questionar se é possível que se alcance a verdade ou mesmo se ela existe, o que nos conduziria a uma discussão longa e prolixa. No momento, considero mais interessante que nos concentremos na relação de dependência entre a crença em uma proposição e o outro elemento da definição de conhecimento apresentada: a noção de justificativa epistemológica. Procurarei mostrar a seguir que i) será no entendimento desta relação que muitas das controvérsias epistemológicas emergirão no ambiente científico e que ii) um cientista está confortável em assumir que possui um conhecimento válido a respeito de algo mesmo sabendo que não pode ter certeza absoluta da verdade dos fatos que apresenta.

Passemos então ao segundo elemento do conhecimento, a necessidade de justificar epistemologicamente uma crença *verdadeira*. Mas, afinal, o que conta como uma justificativa epistemológica para uma crença? Essa é uma das perguntas centrais da filosofia das ciências e para começar a resolvê-la cabe mencionar a definição de Godfrey-Smith (2003, p. 235) para epistemologia, a qual, segundo o autor, é “*a parte da filosofia que lida com questões envolvendo a natureza do conhecimento, a justificativa de crenças, e racionalidade*”. Embora ampla, destaco esta definição porque ela é clara e adiciona um novo e importante componente à discussão, a noção de racionalidade. É senso comum entre filósofos e cientistas que um conhecimento deve ser fundamentado em argumentos racionais para ser científico. Contudo, o uso da razão não garante justificativas infalíveis para a verdade de uma crença e para entender porque, consideremos os dois raciocínios elementares que a filosofia apresenta, os raciocínios indutivo e dedutivo. Pelo primeiro raciocínio, o cientista procura estabelecer afirmações gerais a partir de afirmações singulares (Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003). Pelo segundo raciocínio, o cientista conclui uma afirmação inequívoca dado que um certo conjunto de premissas sejam aceitos *a priori*.

O problema do raciocínio indutivo fica evidente com o clássico exemplo do cisne negro, em que a observação de um número limitado de cisnes negros não garante que todos os cisnes sejam negros como gostaria o indutivista. Este exemplo trata de uma forma muito simplista de raciocínio indutivo que não se adequa a qualquer situação real vivenciada por um cientista atualmente. Porém, ficará claro adiante que a busca por generalizações a partir de observações particulares, embora não garantida, permanece

como uma necessidade do cientista contemporâneo. Já o problema do raciocínio dedutivo é um pouco mais sutil, mas fica evidente no clássico exemplo usado em livros-texto de epistemologia e que expresso abaixo:

**Premissa 1 (P1):** *Todo ser humano é mortal.*

**Premissa 2 (P2):** *Jorge é humano.*

**Conclusão (C):** *Jorge é mortal.*

Se aceitamos P1 e P2, C é inevitável. Contudo, o mesmo raciocínio se aplica no seguinte exemplo:

**Premissa 1 (P1):** *Todo ser humano torce para o palmeiras.*

**Premissa 2 (P2):** *Jorge é humano.*

**Conclusão (C):** *Jorge é palmeirense.*

Aqui fica evidente o problema do raciocínio dedutivo. Ele continua correto (*i.e.* se P1 e P2, então C), mesmo que as premissas, inquestionavelmente aceitas, não sejam verdadeiras como é o caso de P1. Existem outras complicações discutidas a respeito da lógica dedutiva, porém o problema acima destacado talvez seja o mais recorrente quando transferimos o raciocínio dedutivo para casos concretos do dia a dia de um cientista. Esse problema é inevitável para quem deseja fazer inferências a respeito dos fenômenos naturais tais quais eles se manifestam no mundo externo ao do inferidor. O raciocínio dedutivo, como mostrarei mais adiante, se ajusta rigorosamente apenas na matemática, a qual desenvolve teorias em nível abstrato (*e.g.* por meio de teoremas) que independem de experiência para serem válidas. Além disso, como as premissas usadas em deduções matemáticas são postulados ou outros teoremas já demonstrados rigorosamente (*i.e.* deduzidos), essas premissas não são contestáveis, somente aceitas. Em suma, pode-se dizer que a lógica dedutiva não é garantida quando aplicamos o raciocínio abstrato da matemática na resolução de problemas concretos em física ou biologia.

A constatação de que não há meios racionais de se garantir a validade de uma inferência a respeito do mundo externo ao cientista implica que a epistemologia não é capaz de justificar inequivocadamente uma crença <sup>2</sup>. Se a validade científica de um conhecimento dependesse exclusivamente do indutivismo ingênuo ou do dedutivismo puro (*i.e.*, dos raciocínios elementares) ou de critérios garantidos de inferência, é muito provável que só houvesse a matemática como conhecimento epistemologicamente válido. No entanto, os filósofos se deram conta que os cientistas *resolveram* este problema epistemológico fundamental utilizando raciocínios alternativos aos elementares, como as lógicas hipotético-dedutiva e dedutivo-nomológica (Salmon, 1989; Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003). Em meados do século

---

<sup>2</sup>Portanto, uma crença verdadeira se levarmos a rigor.

XX, estas sofisticções dos raciocínios elementares se consolidaram como métodos válidos na construção do conhecimento científico. Porém, muitas das controvérsias e conflitos epistemológicos das últimas décadas se devem a alguma crítica a estes raciocínios alternativos. Dada a relevância deste tópic, dedicarei as próximas subseções a i) uma contextualização histórica do pensamento científico a partir do século XV, com ênfase no período pós século XIX e a ii) uma breve análise crítica das lógicas hipotético-dedutivista e dedutivo-nomológica para assim chegar a iii) uma conclusão geral a respeito da problemática epistemológica na ecologia.

## **2.2 Contexto histórico-filosófico da ciência entre os séculos XV e XX**

Venho mostrando que o desenvolvimento epistemológico é uma consequência natural dos desafios racionais que são impostos ao cientista em sua busca pelo conhecimento. Na subseção anterior, dediquei-me a apresentar os raciocínios elementares sob uma perspectiva puramente filosófica, que ainda pode estar muito abstrata para o leitor. Neste seção, retomarei a problemática dos raciocínios elementares apresentando-a dentro de um contexto histórico e citando exemplos convencionais e didáticos comumente mencionados na literatura a fim de tornar minha exposição menos abstrata.

Podemos dizer que qualquer estudo científico se inicia com problemas e questões que derivam deles. Demarcar a origem da ciência como uma atividade consciente é complicado, mas costuma-se dizer que a ciência se inicia com a filosofia dos gregos antigos, em especial com os pensamentos de Platão e Aristóteles (Gewandsznajder, 1989). Em linhas muito gerais, embora a visão aristotélica tenha predominado durante toda a antiguidade clássica, ela foi substituída por uma visão eclesiástica na Idade Média, a qual obscureceu o desenvolvimento da ciência em detrimento da obediência humana às leis divinas estabelecidas pela igreja (Eves, 2004). Apesar da relevância histórica destas transformações, a literatura contemporânea em epistemologia se dedica, predominantemente, a analisar com profundidade o desenvolvimento científico a partir do século XV (*e.g.* Gewandsznajder, 1989; Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003) – quando se inicia um movimento que os historiadores denominam de revolução científica – e dando ênfase ainda maior ao período pós século XVIII. A transição entre os século XV e XVI marca a queda do sistema feudal e a difusão do capitalismo com a ascensão de uma burguesia comerciante que, no âmbito científico, se caracterizou por uma liberação do pensamento humano por meio de sua desvinculação do pensamento místico e eclesiástico que vogou durante a Idade Média (Eves, 2004). Em

suma, esta fase marca a substituição da uma visão centrada na religião católica (*i.e.* teocêntrica) para uma visão centrada no homem (*i.e.* antropocêntrica). Historiadores e filósofos costumam mencionar que a introdução da perspectiva heliocêntrica por Copérnico e enfatizada por Galileu Galilei em oposição à perspectiva eclesiástica geocêntrica é o exemplo marcante desta transformação racional do pensamento humano. Deve-se notar, no entanto, que a religião não fora abandonada nesta época entre os cientistas<sup>3</sup>, os quais ainda concebiam o criacionismo como origem do universo, porém com uma interpretação bastante individualista em que o homem seria o exemplo da manifestação da perfeição divina, “da obra prima da criação”, e a quem caberia a compreensão da natureza e seus fenômenos a fim de transformá-la a favor da humanidade (Arruda, 1991). Como vimos no capítulo anterior, o criacionismo só passou a ser veementemente contestado a partir da metade do século XIX, após a publicação da teoria de Darwin e Wallace.

Após o século XV, iniciou-se um processo de formalização científica, com diversos pensadores, como Francis Bacon e René Descartes, se voltando a descrever em que consiste o *método científico* e a produzir as primeiras classificações das ramificações da ciência (Pearson, 1900). A proposta humanista e antropocêntrica dos pensadores modernos, retomou alguns valores clássicos greco-romanos, como a filosofia, a matemática e a retórica (Eves, 2004). Porém, a característica mais notória em termos epistemológicos, a meu ver, foi a ênfase que muitos cientistas desta época deram à empiria (*i.e.* à necessidade de qualquer afirmação sobre o funcionamento da natureza ser *comprovada* com base na experiência individual fundamentada na observação dos fatos como eles são; Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003). A literatura filosófica contemporânea costuma dividir os cientistas desta época entre os racionalistas, os quais tinham uma veia mais teórico-matemática, e os empiricistas, os quais estavam mais preocupados em como demonstrar empiricamente suas afirmações a respeito da natureza<sup>4</sup> (Gewandsznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). Um aspecto importante a se destacar é que muitos empiricistas foram demasiadamente impetuosos em sua proposta científica. Segundo Chalmers (1993, p. 23), filósofos como Bacon “*sintetizaram a atitude científica da época ao insistirem que, se quisermos compreender a natureza, de-*

---

<sup>3</sup>Cabe destacar que René Descartes e Isaac Newton, exemplos de grandes cientistas deste período, declaravam-se católicos abertamente.

<sup>4</sup>Devo alertar que esta divisão é muito simplista, pois o termo racionalista é usado para definir outras correntes de pensamento do século XX, as quais são distintas da apresentada na dualidade empiricista *vs* racionalistas. O exemplo típico é a proposta científica de Karl Popper que será discutida mais adiante. Contudo, esta divisão é útil no sentido didático, pois ajuda a entender as perspectivas que estiveram ou estão em jogo no debate epistemológico. Esta divisão põe em evidência uma interpretação dualista da ciência da época, que pondera diferentemente o papel da teoria e da empiria no processo de aquisição de conhecimento.

*vemos consultar a natureza e não os escritos de Aristóteles*". Esta perspectiva foi a semente das grandes controvérsias da epistemologia contemporânea, uma vez que o resgate da lógica e da matemática, como já mencionado, também foi um componente importante da transformação intelectual das sociedades ocidentais deste período. Assim, a problemática referente ao raciocínio indutivo começa a ganhar a devida notoriedade nas discussões filosóficas sobre a ciência.

Na subseção anterior, mostrei que o problema indutivista reside na impossibilidade de se garantir a verdade de uma afirmação geral com base em um conjunto de afirmações singulares como justificativa. No século XVIII, este problema foi devidamente explorado e formalizado pelo escocês David Hume. Este filósofo adotou uma postura cética a respeito do indutivismo que, de acordo com Godfrey-Smith (2003, p. 40), "*assombrou o empiricismo desde então*". Hume levanta a seguinte questão, "*que razão nós temos para pensar que o futuro se assemelhará ao passado?*" (Godfrey-Smith, 2003, p. 39). Não é porque o sol nasceu todos os dias até hoje que podemos ter certeza que ele nascerá amanhã ou, como já mencionado, o fato de eu ter observado apenas cisnes brancos não me autoriza a afirmar que o próximo cisne que eu observarei será branco, muito menos me permite generalizar que todos os cisnes são brancos. Apesar de cético em relação ao indutivismo como meio racional de se constatar a verdade de uma crença, Hume não propunha o abandono da indução como meio de obtenção de conhecimento já que a inferência indutiva é uma forma *psicológicamente natural* (Godfrey-Smith, 2003) e primitiva de predição que ajudou (e ainda ajuda) sobremaneira o homem em suas atividades corriqueiras. Talvez por isso, a indução seja um raciocínio tão empregado na formulação do que podemos chamar de conhecimento popular. Ademais, para Hume e outros filósofos, qualquer inferência sobre como o mundo é depende necessariamente da experiência que temos e das observações que fazemos deste mundo; só assim podemos constatar a veracidade de alguma afirmação, hipótese ou teoria.

As noções levantadas por Hume fazem sentido, mas ao mesmo tempo soam contraditórias. Como ser cético ao indutivismo e ao mesmo tempo adotar uma postura empiricista na prática científica se, em última instância, o cientista se dedica a providenciar conhecimentos verdadeiros para a humanidade? Este tem sido o drama epistemológico do cientista desde o século XVIII, encontrar um caminho lógico que integre dois conceitos fundamentais que definem a ciência, empiria e teoria. Foi somente no século XX que respostas mais coerentes para a problemática epistemológica na ciência foram propostas pelos filósofos e para entendê-las é preciso esclarecer um pouco mais o impacto que a visão empiricista-indutivista provocou no pensamento científico. O raciocínio indutivo carrega consigo uma expectativa

de generalização que, a meu ver, é intrínseca da atividade científica independente da episteme que o pesquisador utiliza em seus estudos. Daqui em diante, procurarei expor minha argumentação tendo o conceito de generalidade como base, uma vez que esta é uma noção geradora de grandes disputas em debates epistemológicos na ecologia (El-Hani, 2006).

O conceito de generalização é complexo demais para ser definido apropriadamente em poucas palavras ou numa simples sentença (este tópico é muito bem abordado no contexto da ecologia por El-Hani, 2006). Começarei com uma definição abrangente a fim de chegar, ao final desta seção, em uma noção mais elaborada do conceito. Generalizações não existiriam se tivéssemos conhecimento completo do universo. É justamente por não darmos conta de assimilar toda a complexidade da natureza instantaneamente que criamos alguns artifícios para compreender o mundo, sabendo que teremos sempre informação limitada sobre ele. Deste modo, a definição do indutivista ingênuo é que generalizar consiste em extrapolar o conteúdo informativo de uma evidência para casos que não foram contemplados nas observações usadas para justificar a evidência. O conceito de generalização evoca também as noções de regularidade e de expansão do conhecimento pela predição de acontecimentos. Embora generalizações do tipo indutivista ingênua não sejam garantidas, o apelo indutivista é forte: é muito difícil contestar que há uma regularidade na ideia de todos os cisnes observados serem brancos (caso isso ocorra) ou de todo dia o sol nascer. Os empiricistas, portanto, se valem de uma noção relevante; a de que nosso conhecimento avança conforme melhoramos nossa capacidade de prever experiências futuras (Godfrey-Smith, 2003). Desta forma, o empiricista procura estabelecer uma relação entre predição e generalização, já que o acúmulo de predições bem sucedidas (*i.e.* demonstradas com evidências justificadas empiricamente) seria suficiente para o cientista estabelecer leis naturais que o ajudariam a descrever os fenômenos da natureza de modo sintético. Este tipo de alegação deflagra outro problema do indutivista ingênuo, o de atribuir à observação e não à teoria o início do processo de construção do conhecimento (*e.g.* Gewandsznajder, 1989; Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003). Em outras palavras, este problema reside na noção equivocada e ingênua de que as leis da natureza são obtidas pelo acúmulo de observações particulares sem que haja prévias concepções a respeito do fenômeno estudado pelo observador. Não foi a lenda da maçã caindo de uma árvore o motivo das observações que levaram Newton a propor sua lei da gravitação universal, mas certamente suas concepções prévias a respeito de teorias já disponíveis, como a gravitacional de Galileu e a das órbitas elípticas dos planetas ao redor do sol de Kepler (Gewandsznajder, 1989; Chalmers, 1993).

Após uma forte ênfase no empiricismo, voltemos nossa atenção para a proposta científica raciona-



lista<sup>5</sup>, afinal um dos sentidos desta tipologia é deflagrar uma oposição de pensamentos. Os racionalistas deste período eram, quase que exclusivamente, matemáticos e/ou filósofos que usavam predominantemente o raciocínio dedutivo em seus estudos. Este grupo de cientistas é frequentemente representado por Descartes (Chalmers, 1993). É inegável que dentre as principais contribuições dos matemáticos modernos, em especial aqueles que vieram após o século XVII, estiveram o resgate, a aplicação e o aprimoramento do método dedutivo axiomático de Euclides (*c.f.* Eves, 2004, p. 655-73). Por se guiarem pelo raciocínio lógico dedutivo, os racionalistas lidam de forma diferente com o conceito de generalização, pois ela está contida nas premissas e não nas predições de uma proposição científica. Isto fica evidente no clássico exemplo dedutivista mencionado na subseção anterior, em que a primeira premissa – “todo ser humano é mortal” – é uma afirmação com alto grau de generalidade, já que descreve uma característica (*i.e.* mortalidade) de tudo aquilo que possa ser definido como ser humano. Portanto, os racionalistas claramente se valem da noção de que a teoria precede a observação (Chalmers, 1993). Como levantado na subseção anterior, um problema do raciocínio dedutivo para o empiricista está na aplicação desta lógica na construção de conhecimentos que requerem o estudo dos fenômenos naturais tal qual eles ocorrem no universo. Qual é a garantia que temos ao assumir como verdadeira qualquer premissa que possa ser feita a respeito do mundo *real*, concreto ou qualquer outro termo que usemos para distinguí-las de premissas a respeito de um mundo abstrato como pensado pelos matemáticos? Questionado de outra forma, como garantir que o uso do raciocínio dedutivo nas ciências naturais não recairá no segundo exemplo do raciocínio dedutivo mencionado na seção anterior, o qual nos leva a uma dedução logicamente válida, porém a uma conclusão não obrigatoriamente verdadeira?

Outro aspecto racionalista bastante criticado por alguns empiricistas ingênuos foi a adoção de uma visão de mundo mecanicista, a qual busca explicar as causas e os efeitos dos fenômenos naturais. Os empiricistas tinham grandes dificuldades em aceitar o papel explicativo da ciência e em admitir que conceitos não observáveis, como o de mecanismo causador, podiam ser aplicados em estudos científicos. Caberia ao cientista apenas descrever os fenômenos ou os padrões da natureza<sup>6</sup>. Contudo, muitos racionalistas não tinham muitas dúvidas sobre a relevância de uma abordagem mecanicista para as ciências naturais. Esta abordagem começou a ser desenvolvida por Descartes no século XVI e se consolidou

---

<sup>5</sup>Se é que existem propostas bem definidas neste caso, uma vez que a divisão racionalista e empiricista é artificial e cumpre um papel apenas didático. Sugiro a leitura de filósofos com uma visão menos convencional (*e.g.* Laudan, 1981) para uma visão mais completa do tópico.

<sup>6</sup>Está é uma discussão filosófica ampla cujo aprofundamento não está no escopo desta tese. Sugiro as leituras de Godfrey-Smith (2003, p. 190-201) e de Salmon (1989), as quais fornecem sínteses introdutórias sobre o tema.

com os estudos de Newton, entre os séculos XVI e XVII (Godfrey-Smith, 2003). Diversos fenômenos naturais – *e.g.* a atração gravitacional, eclipses, a formação de um arco-íris – puderam ser explicados pelas leis propostas por Newton. Por exemplo, ele explicou que a queda-livre de um corpo solto a uma determinada altura do solo é causada pela força gravitacional, a qual é definida por uma relação entre a massa dos corpos em questão (neste caso do corpo em queda-livre e da Terra) e o quadrado da distância entre esses corpos. Newton, desta forma, mostrou que esta relação é dada por uma lei universal que pode ser descrita por uma equação matemática<sup>7</sup>.

A obra deste cientista é muito vasta. Newton não apenas elaborou teorias e leis que nortearam a física por séculos, mas ele também formulou, simultaneamente a Leibniz, os princípios do cálculo diferencial que transformaram profundamente a matemática analítica (Eves, 2004). Seus estudos incluíram muita teoria e empiria, o que torna difícil classificá-lo como racionalista ou empirista, sugerindo que esta tipologia talvez seja útil apenas para alguns filósofos e não para o cientista em si. Para sintetizar este conflito entre empiricistas e racionalistas, meu argumento está de acordo com a perspectiva de Godfrey-Smith (2003, p. 11). Este filósofo diz que para evitarmos falsas oposições, deveríamos ter em mente que *“a matemática usada como uma ferramenta dentro do ponto de vista empiricista é o que faz a ciência especial”*. Considero que esta afirmação representa bem o espírito de muitos cientistas, especialmente dos físicos<sup>8</sup>, entre os séculos XV e XX. Segundo o mesmo autor (p. 39), o problema fundamental da filosofia da ciência dos últimos séculos é responder *“que conexão entre observação e teoria faz desta observação evidência para a teoria”*? Este problema é extremamente complexo e muitos filósofos já se debruçaram e ainda se debruçam nele sem chegarem a consensos absolutos. Neste aspecto, minha intenção é bem menos ambiciosa e está focada em fornecer o contexto necessário para discutir duas respostas muito relevantes ao problema, apresentadas no século XX, que me auxiliarão a apresentar claramente meu ar-

---

<sup>7</sup>A lei da gravitação universal de Newton é expressa pela seguinte equação:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

onde  $F_g$  é a força gravitacional,  $m_1$  e  $m_2$  são as massa dos corpos envolvidos,  $d$  é a distância entre eles e  $G$  é a constante de gravitação universal, cujo valor expressa a atração gravitacional, em newtons, entre dois corpos com massa  $m_1 = m_2 = 1\text{kg}$  e separados por um metro de distância.

<sup>8</sup>O encontro da matemática com a biologia é bem posterior à origem desta como uma disciplina científica no começo do século XIX. Como mostrei no capítulo anterior, a teoria celular e a teoria evolutiva foram elaboradas sem o uso da matemática ou de quantificações com base em experimentos controlados rigorosamente, como os físicos procuraram fazer, bem ou mal, desde Copérnico e Galileu. A matematização e a experimentação controlada começam a ser praticadas na biologia com os estudos biométricos de Galton e Pearson no final do século XIX, mas é só depois da década de 1920 que estas práticas se consolidam.

gumento geral referente ao pluralismo interepistêmico na última seção deste capítulo. Estas respostas foram os raciocínios (ou métodos) hipotético-dedutivo e dedutivo-nomológico (ou também chamado de modelo da lei de cobertura) (Salmon, 1989; Godfrey-Smith, 2003).

Antes de seguir nessas duas abordagens epistemológicas, devo ressaltar um ponto que está em jogo em minha exposição, mas que ainda pode parecer obscuro para o leitor. Venho mostrando que os filósofos – e aqui podemos incluir alguns cientistas também<sup>9</sup> – buscaram e ainda buscam descrever um *método* que qualifique o conhecimento científico, ou seja, uma proposta de definição do conhecimento científico pelo seu método. A ideia contida nessa proposta é que o método científico deve conter atributos particulares que o distingua em relação aos métodos usados na obtenção de outros tipos de conhecimento. As consequências desta busca por um método exclusivo serão examinadas mais adiante. Por enquanto, analisemos um processo histórico apresentado por Laudan (1981). Trata-se da transição de um projeto de ciência baseado na *tese da verdade certa, instantânea*<sup>10</sup> para outro baseado na *tese auto-corretiva*. A meu ver, o ponto de vista de Laudan é bastante elucidativo e sintetiza muito bem tudo que venho discutindo sobre a transformação do pensamento científico nos últimos séculos.

Segundo Laudan (1981, p. 227),

*The proponents of TICT believed that science could dispense with conjectures and hypotheses since there was, ready at hand, an "engine of discovery" (as Hooke called it) which could infallibly (and usually mechanically) produce true theories. The concept of progress, within the framework of TICT, was clear and unambiguous. Progress, on this view, could only consist in the accumulation of new truths. The replacement of one partial truth by another simply made no sense in this context. Growth, in so far as it occurred, was by accretion rather than by attrition and modification.*

Como podemos notar, esta *tese* descreve nada menos que o projeto empiricista do indutivista ingênuo. Portanto, a *tese da verdade certa, instantânea* padece das mesmas críticas do indutivismo, resumidas em dois grandes problemas por Laudan (1981): o da falácia de afirmar o conseqüente (*c.f.* Salmon, 1989, p. 30) e o da indução eliminativa (um problema classicamente abordado nos livros-texto; *e.g.* Chalmers, 1993; Gewandsznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). O primeiro problema é considerado um erro lógico trivial e pode ser entendido claramente com o seguinte exemplo: suponha i) que um dos sintomas (S) de alguém gripado (D) seja a febre e que ii) observamos (O) alguém com febre. Jamais

---

<sup>9</sup>Para ser mais preciso, Laudan (1981) se refere a esses pesquisadores como teóricos de métodos, os quais incluem cientistas como Hooke e Newton, por exemplo.

<sup>10</sup>Traduzido da expressão em inglês, *thesis of instant, certain truth* de Laudan (1981, p. 227), abreviada como TICT pelo autor.

poderíamos afirmar D com base em apenas em S e O, ou seja não podemos afirmar que alguém tem gripe só porque está com febre<sup>11</sup>. Desta forma, os adeptos da *tese da verdade certa, instantânea* cometiam esta falácia ao insistirem em afirmar que “*a habilidade de uma teoria em predizer com sucesso um resultado experimental era uma evidência prima facie de que a teoria era uma verdade provada.*” (Laudan, 1981, p. 228). Já o problema da indução eliminativa consiste na impossibilidade de se conceber todas as hipóteses que podem dar conta de explicar um dado evento e, portanto, ser impossível ter certeza da veracidade de uma hipótese mesmo que ela tenha sobrevivido aos mais variados testes empíricos (Laudan, 1981). Ao encarar a progressão da ciência como a arte de buscar a verdade certa e absoluta pelo acúmulo de evidências favoráveis, o defensor da *tese da verdade certa, instantânea* cometia também o equívoco da indução eliminativa.

Conscientes dos problemas da indução, alguns filósofos e metodólogos já propunham, desde Descartes, uma teorização baseada no que Laudan (1981, p. 1) chama de *método de hipóteses*, que nada mais é que o protótipo do método hipotético-dedutivo popperiano que apresentarei mais adiante<sup>12</sup>. Assim, estes metodólogos assumiram um *compromisso* que é muito bem caracterizado por Laudan (1981, p. 228-29) no seguinte trecho:

*Even if the scientist's methods do not guarantee that he can get the truth on the first attempt, perhaps he can at least hope to get ever closer to it. Even if the methods of science are not foolproof, perhaps they are capable of correcting any errors the scientist may fall prey to. ... it was a face-saving ploy, for it permitted the scientist to imagine that his ultimate goal was, as TICT had suggested, the Truth; ... although the scientist now had to be satisfied with the quest for ever-closer approximations rather than the truth itself.*

Um pouco mais à frente, este filósofo continua sua exposição sobre os proponentes da *tese auto-corretiva* dizendo que eles consideravam a ciência “*não como uma disciplina em que as teorias eram de alguma forma extraídas ou deduzidas*<sup>13</sup> *de experimentos, mas como uma (disciplina) em que as teorias eram formuladas, testadas, rejeitadas e substituídas por outras teorias*” (Laudan, 1981, p. 229). Portanto, o programa científico daqueles que seguiram a *tese auto-corretiva* – pelo menos de seus primeiros proponentes – consistiu em buscar continuamente teorias cujas explicações se aproximassem mais da verdade do universo (da natureza) e em rejeitar aquelas teorias que se mostrassem falsas.

---

<sup>11</sup>Apenas o contrário é verdadeiro, *i.e.* deduzir O com base em S e D, ou predizer que alguém gripado ficará com febre.

<sup>12</sup>Podemos também classificar esses metodólogos como racionalistas de acordo com a visão tradicional em filosofia das ciências.

<sup>13</sup>Embora Laudan tenha escrito *deduzidas de experimentos*, creio que, neste caso, caberia melhor a expressão *induzidas por experimentos*.

O projeto auto-corretivo de ciência se desenvolveu consideravelmente a partir da segunda metade do século XVIII e se consolidou no final do século XIX. Porém, como toda proposta filosófica geral, esta proposta possui limitações que foram devidamente criticadas na literatura. Por exemplo, os proponentes da *tese auto-corretiva* se valiam de uma analogia com métodos de inferência matemática, como os envolvidos no cálculo da raiz quadrada de dois, um número irracional com infinitas casas decimais. Cada vez que aumentamos uma casa decimal na estimativa da  $\sqrt{2}$ , estamos chegando mais próximos do valor verdadeiro desta raiz. O mesmo ocorreria com o progresso científico ao elaborarmos experimentos para rejeitarmos hipóteses falsas e aceitarmos hipóteses mais próximas da verdade. Contudo, esta analogia é considerada incompleta pois apesar de proporem que a atividade científica é auto-corretiva, seus seguidores não foram capazes de mostrar, clara e efetivamente, qual seria esse método auto-corretivo. Outra alegação contra o projeto auto-corretivo foi que muitas vezes seus proponentes ignoraram uma perspectiva de progresso científico baseado no aumento da probabilidade de uma teoria ser verdadeira (o que Laudan chama de “*progresso por probabilificação*”), em oposição à refutação e substituição de teorias típicas da proposta auto-corretiva. Em suma, Laudan (1981) mencionou que, enquanto a sugestão dos auto-corretivistas era “desenvolva experimentos que irão indicar as fraquezas de suas teorias”, a sugestão dos probabilificacionistas era “desenvolva experimentos que, se seus resultados forem favoráveis, irão contribuir bastante para a verossimilhança de suas teorias”. O que quero enfatizar aqui é que a *tese auto-corretiva* e seus desdobramentos influenciaram importantes correntes de pensamento do século XX (e.g. o positivismo lógico ou empiricismo lógico – com sua abordagem dedutivo-nomológica e sua *lógica* indutiva – e a proposta hipotético-dedutiva de Karl Popper – chamada popularmente de falsificacionismo – a qual se consagrou como método convencional usado pela maioria dos cientistas do final do século XX; Gewandsznajder, 1989; Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003). Isso fica claro em um último excerto de Laudan (1981, p. 235):

*It would be wrong to give the impression that these two alternative theories of scientific progress, one by self-correction and the other by probabilification, were mutually exclusive. On the contrary, several of the best-known methodologists of the period (e.g., Whewell and Bernard) adopted both . . . . These two approaches did, however, represent different emphases, and were to give rise in the 20th century to two very different strains in philosophy of science (Carnap and Keynes being the descendants of the progress by probabilification school, and Popper and Reichenbach focussing primarily on progress by self-correction).*

Será sobre essas correntes filosóficas que a próxima seção tratará.

### 2.3 Desdobramentos da tese auto-corretiva no século XX

No período entre as duas guerras mundiais, um movimento denominado positivismo-lógico ou empiricismo-lógico se iniciou na Áustria, *fundado* por um grupo de filósofos que se autodenominaram como o *círculo de Viena* (Godfrey-Smith, 2003). Este movimento é bastante controverso na literatura filosófica, pois existe muita dificuldade em se descrever com clareza qual é a real proposta desta corrente de pensamento. Reconhecendo esta dificuldade, devo notar que basearei-me nas perspectivas de Godfrey-Smith (2003) para apresentar as principais características do empiricismo-lógico de forma resumida. Em alguns pontos específicos, valerei-me também do estudo de Salmon (1989).

Em linhas gerais, esta corrente filosófica inicialmente se caracterizou por ser uma versão extrema do empiricismo, mas que, paulatinamente, tentou se adequar às duras críticas recebidas na época. Para os positivistas lógicos, as problemáticas do final do século XIX referentes à disseminação do ponto de vista *auto-corretivo* da ciência se transformaram num problema de confirmação e verificação teórica que poderia ser resolvido pelo desenvolvimento de uma linguagem lógica apropriada para lidar com a questão (Salmon, 1989; Gewandznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). De acordo com Godfrey-Smith (2003), os empiricistas lógicos formularam uma teoria da linguagem em que o termo *confirmação* foi definido como uma *relação abstrata entre sentenças*. Esta teoria, segundo o mesmo filósofo, foi embasada em duas ideias principais: uma distinção entre analítico e sintético e no uso da *teoria da verificabilidade do conhecimento*. Estes, a meu ver, foram os principais atributos que qualificaram esta vertente filosófica.

Uma das grandes dificuldades do empiricista-lógico foi aceitar o caráter abstrato de muitas teorias, uma vez que, por princípio, a ciência deveria lidar apenas com o que é observável. Deste modo, teorias abstratas, como as da matemática, impossibilitariam a derivação de hipóteses empiricamente testáveis ou verificáveis. Godfrey-Smith (2003, p. 26) descreve este posicionamento dizendo que os empiricistas-lógicos “*alegavam que tudo a respeito da matemática e da lógica é analítico*” e que “*proposições matemáticas não descrevem o mundo; elas meramente registram nossa decisão convencional de usar símbolos de um jeito particular. Alegações sintéticas sobre o mundo podem ser expressas pelo uso da linguagem matemática, como quando alega-se que há nove planetas no sistema solar. Mas, provas e investigações dentro da matemática em si são analíticas*”. Godfrey-Smith finaliza esta ideia dizendo que as “*únicas coisas que parecem ser conhecíveis a priori são analíticas e então vazias de conteúdo factual*”. Vemos aqui que os empiricistas-lógicos retomam a questão da observabilidade como ponto fundamental. Estes

filósofos sempre mantiveram o princípio de que nenhuma conclusão é verdadeira se o que ela afirma não tiver passado pelo crivo *confirmativo* de nossos órgãos sensoriais, ou seja, não tiver sido experimentada pelo cientista <sup>14</sup>. Para um físico do século XX, esta visão de mundo poderia ser considerada excessivamente restritiva; basta que evoquemos toda a teoria eletromagnética desenvolvida até então, além, é claro, da teoria da relatividade. Estas duas teorias lidam com entidades não observáveis como o elétron, por exemplo, mas são usadas com sucesso para explicar e prever fenômenos da natureza.

Na tentativa de se adequar a esta e outras críticas direcionadas ao movimento lógico-empiricista<sup>15</sup>, filósofos como Carl Hempel e Rudolph Carnap se dedicaram ao desenvolvimento de teorias de linguagem que permitissem ao cientista uma comunicação clara e *eficiente*. Esta foi a virtude e a fraqueza da proposta lógico-empiricista. Por um lado, ela ressalta algo que considero crucial num mundo em que justificativas racionais para um dado conhecimento não são garantias indubitáveis de sua verdade. Parece-me trivial que soluções racionais para o problema de justificativa jamais serão inequívocas e portanto envolverão, de alguma forma, um acordo entre os cientistas envolvidos no assunto em pauta. Trata-se de mudar o conceito de racionalidade, de torná-lo menos rígido. Neste caso, pelo reconhecimento do papel da linguagem, particularmente da semântica, nesta suavização do conceito e, assim, na comunicação científica. Voltarei neste ponto crucial em meu argumento na última seção deste capítulo. Por enquanto, vejamos o outro lado da proposta de reformulação linguística dos empiricistas lógicos, sua fraqueza.

Embora suas intensões pudessem ser consideradas veneráveis, os filósofos desta corrente de pensamento não foram capazes de prover uma teoria da linguagem clara, inambígua e consensual. Este problema é muito bem discutido tomando-se como exemplo a clássica proposta dedutivo-nomológica de Hempel (Hempel e Oppenheim, 1948), a qual se tornou muito popular na década de 1960, mas que, devido às suas fortes limitações, entrou em descrédito na década seguinte<sup>16</sup> (Salmon, 1989; Godfrey-

---

<sup>14</sup>A visão de Carl Hempel, segundo Godfrey-Smith (2003) mostra muito bem a posição de muitos positivistas-lógicos. Para Hempel, “the only possible role for those parts of language that seem to refer to unobservable entities is to help us pick out patterns in the observable realm. And if the parts of theories that appear to posit unobservable things are really any good, this “goodness” has to show up in advantages the theory has in its handling of observables” (Godfrey-Smith, 2003, p. 35-6).

<sup>15</sup>Estas críticas se assemelham bastante àquelas proferidas aos empiricistas anteriores.

<sup>16</sup>Boa parte dos filósofos consideram essa proposta de Hempel extinta. Godfrey-Smith (2003) se refere ao esquema dedutivo-nomológico, assim como a todo o movimento lógico-empiricista como “*a revolutionary form of empiricism that appeared in the early part of the twentieth century, flourished for a time, was transformed and moderated under the pressure of objections, and then slowly became extinct*”.

Smith, 2003). Antes de descrever esta proposta, quero ressaltar dois aspectos dela que deixam evidente a tentativa de moderação dos problemas epistemológicos da época. Primeiro, ela foi elaborada para lidar com a questão de explicação na ciência, algo que os empiricistas eram relutantes em aceitar como mencionei antes. Segundo, o termo dedutivo em seu nome pode parecer contraditório, dada a forte veia indutivista dos empiricistas. Filósofos como Hempel, no entanto, reconheciam o poder de um argumento dedutivo em prover conclusões verdadeiras<sup>17</sup>. Godfrey-Smith (2003) comenta que estes empiricistas-lógicos *amavam* a lógica e a consideravam como *principal ferramenta* para a epistemologia. Fica claro, portanto, o nome designado a este movimento filosófico.

Em linhas gerais, uma explicação dedutivo-nomológica é simplesmente “*um argumento dedutivo válido cuja conclusão afirma que o evento a ser explicado ocorre*” (Salmon, 1989, p. 8). Contudo, as fortes limitações desta abordagem epistêmica se encontram nos seus detalhes. Para entender suas particularidades é necessário introduzir dois termos fundamentais: *explanans* e *explanandum*. O primeiro são as condições ou antecedentes, ou seja, as premissas envolvidas na explicação de um fenômeno e o segundo é a própria descrição do fenômeno empírico a ser explicado, ou seja, a conclusão do argumento. Para Hempel, é necessário que se cumpram quatro condições de adequação para que uma explicação seja classificada como dedutivo-nomológica: i) a explicação precisa ser um argumento dedutivo válido, ii) os *explanans* devem conter pelo menos uma lei geral, iii) os *explanans* precisam ter conteúdo empírico e iv) as sentenças que constituem os *explanans* precisam ser verdadeiras (Salmon, 1989, p. 12). Com essas condições de adequação, em especial a segunda, é possível definir mais precisamente uma explicação dedutivo-nomológica como aquela que mostra como fazer inferências por meio de um argumento lógico que inclua uma lei da natureza nas premissas (Godfrey-Smith, 2003, p. 234). Esta é a base do esquema explicativo dedutivo-nomológico, também referida como *teoria da cobertura de leis* (do inglês, *covering law theory*; Godfrey-Smith, 2003). Em suma, a recomendação desta proposta epistêmica é: algo só pode ser explicado se em sua explicação houver referência a uma lei geral confirmada e observações prévias verdadeiras sobre o acontecimento a ser explicado. Embora a lógica dedutivo-nomológica tenha atraído a atenção dos filósofos da ciência na metade do século passado, ela sucumbiu rapidamente diante das fortes críticas recebidas. Wesley Salmon dedicou-se a uma revisão crítica da teoria dedutivo-nomológica de Hempel e suas consequências filosóficas (Salmon, 1989). Portanto, restringirei-me a discutir apenas

---

<sup>17</sup>Como já mencionado anteriormente, o principal problema apontado pelos empiricistas lógicos residia na questão referente ao papel do observável e do não-observável na teorização científica.



dois dos problemas enfrentados pelos seguidores desta proposta epistêmica.

O primeiro deles é que Hempel foi incapaz de prover uma definição satisfatória para o conceito de lei da natureza (Salmon, 1989). Considero que eu já tenha discorrido o suficiente para trazer à tona uma das questões fundamentais dentro do tópico *generalização teórica*, mas que deixei em segundo plano até agora: afinal, o que é uma lei da natureza, uma lei geral ou uma lei universal? Desde o capítulo anterior venho dizendo que os cientistas buscam generalizar suas inferências por meio de leis da natureza, um conceito bastante controverso e difícil de ser precisamente definido. Para Hempel, leis são sentenças que possuem, obrigatoriamente, quatro propriedades: i) elas tem uma forma universal, ii) seus escopos são ilimitados, iii) não contém designações de objetos particulares e iv) contém apenas predicados puramente qualitativos (Salmon, 1989). As propriedades i) e ii) são muito restritivas, pois para ser considerado lei um enunciado deve ser uma afirmação válida para todo e qualquer ponto do universo e ser atemporal. Se juntarmos a propriedade iii), afirmações do tipo “todo ser vivo contém água” não poderiam ser caracterizadas como uma lei geral<sup>18</sup>, visto que se refere a seres que vivem na Terra. Para um biólogo, este tipo de alegação é um enorme contra-senso. A propriedade iv) ainda permanece obscura para mim; não fui capaz de encontrar um significado apropriado para *puramente qualitativo*. Derivações da teoria nomotética de Hempel procuraram relaxar a premissa da universalidade, assumindo uma definição, a meu ver, mais plausível de generalidade, a qual reconhece níveis de generalização (Godfrey-Smith, 2003). Então, a afirmação sobre a dependência dos seres vivos por água poderia ser caracterizada como uma lei geral, porém agora dentro dos limites de um dado domínio, a Terra (Salmon, 1989). Esta flexibilização do conceito, assim como outras questões relacionadas, serão tópicos essenciais nos quais me aprofundarei na próxima subseção. O que deve ser ressaltado neste momento é que qualquer esquema dedutivo-nomológico não foi capaz de esclarecer de que forma uma lei da natureza pode ser obtida<sup>19</sup>. É possível elaborar alguma heurística objetiva para garantir que uma afirmação é uma lei? Esta questão está no âmago da discussão epistemológica que venho apresentando e não há uma resposta clara para ela.

O segundo problema que ressalto da proposta dedutivo-nomológica refere-se aos tradicionais problemas já discutidos da lógica dedutiva: a falácia de afirmar o conseqüente e a dificuldade em se assumir

---

<sup>18</sup>Prefiro referir-me às leis de Hempel como leis *universais* para destacar este caráter restritivo do conceito de generalização.

<sup>19</sup>Presumo que a resposta dos empiricistas-lógicos seja: indutivamente.

confiantemente a veracidade das premissas usadas no raciocínio (inclui-se aqui o problema discutido acima sobre determinar a validade de uma lei geral). É interessante observar que os proponentes do esquema dedutivo-nomológico de explicação reconheciam que a lógica dedutiva não fornecia uma *análise completa da evidência e do argumento na ciência* (Godfrey-Smith, 2003, p. 41). Por exemplo, algumas leis gerais, como a do decaimento radioativo, são probabilísticas (Salmon, 1989, p. 54). No entanto, estes filósofos propuseram uma resposta desastrosa, no mínimo muito controversa, para o problema. Godfrey-Smith (2003, p. 44) comenta que a solução apresentada foi “*formular uma lógica indutiva que parecesse, o quanto fosse possível, com a lógica dedutiva, emprestando ideias da lógica sempre que possível*”. E assim, Hempel elaborou o esquema indutivo-estatístico de explicação científica que, resumidamente, constou em incluir uma lei geral da estatística nas premissas. Outro filósofo que se dedicou bastante a esse problema foi Carnap, que como mencionado no final da subseção anterior, rumou para o caminho da *probabilificação*. Em poucas palavras, este caminho consistiu em elaborar uma linguagem específica pela qual a atribuição de probabilidades às teorias e suas conclusões seria possível. Para um aprofundamento sobre a *lógica indutiva* e seus problemas, recomendo a leitura de Salmon (1989).

Vimos, portanto, que a principal característica da proposta lógico-empiricista, seu apelo à linguagem, foi duramente criticada, provocando o colapso desta vertente epistêmica entre os filósofos da ciência. Um dos grandes responsáveis por este colapso foi Karl Popper, um filósofo também austríaco, que chegou a frequentar reuniões do ciclo de Viena, mas que foi um forte opositor do positivismo lógico (Chalmers, 1993; Gewandzajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). Ao contrário dos integrantes do círculo de Viena que estavam interessados em tópicos mais amplos e genéricos, como elaborar uma teoria da linguagem e do significado para a ciência, Popper estava interessado em entender qual é a diferença entre teorias científicas e não científicas (Godfrey-Smith, 2003, p. 58). Este filósofo era cético em relação ao indutivismo e sua proposta epistêmica vai de encontro a um princípio fundamental dos empiricistas lógicos, o de que as teorias não só podiam mas deveriam ser confirmadas para serem válidas<sup>20</sup>. Popper reconhecia apenas o raciocínio dedutivo como válido em inferências científicas. Ciente do problema da eliminação indutiva mencionado na subseção anterior, ele não admitia a possibilidade de obtermos qualquer informação relevante sobre a verdade de uma teoria. Portanto, a confirmação teórica seria inviável e este projeto, característico dos empiricistas lógicos, deveria ser abandonado em nome de uma abordagem

---

<sup>20</sup>Lembremos que a noção de confirmação está intimamente relacionada ao raciocínio indutivo dos empiricistas (Godfrey-Smith, 2003).

falsificacionista, pela qual teorias poderiam ser refutadas desde que as hipóteses derivadas dessas teorias fossem falseadas empiricamente.

A proposta epistêmica de Popper, denominada falsificacionismo, nada mais foi que uma retomada dos valores auto-corretivos de progresso científico em conjunto com uma pequena, mas substancial, alteração do método de hipóteses (*i.e.* hipotético-dedutivo). O método hipotético-dedutivo popperiano consiste em três etapas (Godfrey-Smith, 2003): i) com base na teoria disponível ou em observações prévias, o pesquisador elabora hipóteses que deem conta de responder alguma questão de interesse. Em seguida, ii) o pesquisador *deduz* previsões observáveis destas hipóteses e, então, iii) testa empiricamente se suas previsões são falsas. Caso a previsão não seja falseada, o pesquisador volta ao passo ii) e deriva novas previsões da hipótese em jogo. Caso contrário, volta-se ao passo i) e elabora-se uma nova conjectura para responder a questão de interesse. Desta forma, a ciência progride num interminável ciclo de tentativas e erros, de conjecturas e refutações de hipóteses, tal que, a cada ciclo ajustamos e refinamos nossas teorias de modo a ampliar seu poder preditivo, assim como aumentar a precisão de suas previsões (Gewandsznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). A teoria da relatividade geral é comumente citada como um bom exemplo deste processo. Esta teoria sobreviveu a testes empíricos rigorosos a que a teoria da gravitação universal de Newton sucumbiu<sup>21</sup>. As previsões de Einstein eram mais precisas e *válidas* para situações não previstas por Newton (*e.g.* a teoria da relatividade é capaz de prever que corpos de grande massa seriam capazes de desviar a luz próxima a eles; Gewandsznajder, 1989). Contudo, Popper nos proíbe de afirmar que a teoria da relatividade é verdadeira, tampouco que ela é mais verdadeira apenas por ter passado em testes que a teoria newtoniana não foi capaz.

Embora o interesse de Popper não fosse linguístico (como foram os empiricistas lógicos), existe uma questão semântica envolvida em sua proposta. Afinal, percebemos que Popper se preocupa em esclarecer o uso apropriado do termo *falsear* ou *falsificação*. Ademais, podemos dizer que sua teoria se baseia num questionamento do termo confirmação, impondo um novo termo em seu lugar corroboração. Este é o termo que Popper propõe que usemos nos casos em que uma teoria passa por uma grande quantidade de testes sem ser refutada (Chalmers, 1993; Gewandsznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). Não me surpreenderia se neste momento o leitor se perguntasse, mas não seriam essas preocupações meros detalhes linguísticos irrelevantes? Sendo mais específico, porque não podemos dizer que uma

---

<sup>21</sup>Vale recordar que a teoria gravitacional newtoniana promoveu um avanço análogo à teoria da relatividade de Einstein, porém em relação à teoria gravitacional de Galileu.

teoria corroborada foi confirmada momentaneamente? Para Popper, é crucial que usemos definições rigorosas dos termos porque eles devem sintetizar idéias bem claras sobre o que será afirmado sobre uma teoria ou um resultado experimental (Gewandsznajder, 1989). Segundo Godfrey-Smith (2003), a diferença entre confirmação e corroboração é que o primeiro termo implica na noção de comprovação, além de carregar consigo uma expectativa futura, enquanto que o segundo termo simplesmente expressa o *status* atual de uma hipótese ou teoria<sup>22</sup>.

A última característica da filosofia de Popper que quero destacar é seu ponto de vista sobre generalização do conhecimento ou das teorias; sobre como o conceito de generalidade deve ser encarado pelo cientista que usufrui da lógica popperiana. Hipóteses não precisam necessariamente serem derivadas de leis universais ou teorias gerais já corroboradas. Tampouco, hipóteses precisam ser derivadas de fatos – pelo contrário, elas são inventadas justamente para explicá-los (Gewandsznajder, 1989, p. 75). Conjeturar é a parte criativa do processo científico. Entretanto, é recomendável que teorias prévias baseiem a concepção de novas hipóteses. A esse respeito, Gewandsznajder (1989, p. 76) faz o seguinte comentário:

*As hipóteses devem ... ser compatíveis com pelo menos uma parte do conhecimento científico. Entre outros motivos, porque, como qualquer experiência científica pressupõe uma série de conhecimentos prévios, uma hipótese que não tenha qualquer relação com estes conhecimentos dificilmente poderá ser testada.*

Neste sentido, Popper propõe o conceito de *risco de refutação* para explicar como o conhecimento científico avança. Novamente, Gewandsznajder (1989) descreve de modo muito lúcido o que está em jogo nesta perspectiva popperiana. Ele diz (p. 105),

*Quanto mais geral, profunda, simples e precisa for uma hipótese, lei ou teoria, mais acontecimentos ela proíbe, maior seu conteúdo empírico, sua testabilidade, sua refutabilidade e menor sua probabilidade inicial. Logo, maior a chance de nosso conhecimento avançar.*

Vejamos dois simples exemplos que este autor usa para justificar esta proposta de Popper. O primeiro é o caso da dilatação de metais para mostrar como uma teoria quantitativa é *melhor* que uma teoria qualitativa. A citação abaixo descreve este caso (Gewandsznajder, 1989, p. 105):

*... a afirmação de que determinado metal se dilata de um milímetro quando sua temperatura aumenta de 20°C é mais precisa do que a afirmação de que ele simplesmente se dilata quando aquecido. Esta última é refutada caso ele não se dilate, enquanto a primeira é refutada não somente neste caso, mas também se a dilatação não ocorrer dentro do valor*

---

<sup>22</sup>Para Popper não podemos fazer nenhuma inferência futura em decorrência de uma teoria corroborada. Teorias que passam por muitos testes simplesmente indicam que até um dado momento elas ainda não foram refutadas.

*previsto pela lei [teoria]. Portanto, quanto mais específica ou precisa for uma lei [teoria], maior sua refutabilidade e, conseqüentemente, maior seu conteúdo e maior a oportunidade do conhecimento científico avançar.*

Mais adiante, Gewandsznajder (1989, p. 107) nos fornece o segundo exemplo:

*Para exemplificar sua tese, Popper mostra que a reunião do enunciado “na sexta-feira vai chover” e “no sábado fará bom tempo” forma o enunciado composto “na sexta-feira vai chover e no sábado fará bom tempo”, que possui maior conteúdo informativo que cada um dos enunciados isolados. Entretanto, a probabilidade de que o enunciado composto venha a ser verdadeiro é menor que a probabilidade de cada enunciado isolado. O conteúdo informativo do enunciado e sua falseabilidade aumentaram, mas sua probabilidade inicial diminuiu! Assim, previsões vagas, do tipo “vai chover no ano que vem em algum lugar do mundo” tem maior probabilidade inicial de serem verdadeiras que previsões como “vai chover amanhã em São Paulo”, embora esta última seja mais precisa, mais refutável e de maior conteúdo. Tautologias (“vai chover ou não vai chover amanhã”) tem, é claro, probabilidade máxima (100% ou 1), embora sejam desprovidas de conteúdo informativo.*

Portanto, o conhecimento de um cientista a respeito do mundo, da natureza é ampliado tão quanto este cientista consiga elaborar teorias mais gerais, sujeitas a maiores riscos de refutação, para dar conta de resolver seus problemas de estudo.

A proposta popperiana de ciência se disseminou amplamente entre os cientistas, sendo que o método hipotético-dedutivo se tornou o mais popular e usado atualmente (Gewandsznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). Entretanto, a teoria falsificacionista de Popper não é livre de críticas. É necessário que o cientista reconheça as limitações desta proposta, uma vez que o método hipotético-dedutivo não pode ser visto como uma solução genuína ao problema de garantias de inferência, mas deve ser tratado como uma tentativa de *acordo racional* que não se dispõe a inferir verdades *absolutas* mas sim verdades *aproximadas*. Aqui, restringirei-me a discutir três principais críticas ao método hipotético-dedutivo falsificacionista.

A primeira é a já discutida falácia da afirmação do conseqüente que assombra todo cientista que visa aplicar uma lógica dedutiva em sua pesquisa. Aqui, poderíamos alegar que Popper comete esta falha pois o teste experimental de uma hipótese consiste justamente em possibilitar uma inferência que neste caso é uma conclusão a respeito da *validade* da própria premissa, *i.e.*, da hipótese ou teoria que gerou as predições testadas. Popper se esquia deste problema com o enfoque na falsificação ou corroboração como afirmações que informam o estado atual de uma teoria não sua veracidade. A ideia é que as teorias e hipóteses já foram aceitas e o teste empírico fornece apenas uma evidência de que não há problemas em usarmos esta teoria como explicações de questões de interesse, caso as predições do teste tenham sido corroboradas, ou somente indica que há problemas com essa teoria, caso o teste falseie as predições.

No meu ponto de vista, esta ambiguidade no raciocínio de Popper é muito difícil de ser resolvida.

A segunda crítica refere-se ao fato de Popper não ter sido capaz de dar uma resposta satisfatória sobre como podemos efetivamente garantir a falsificação de uma hipótese (Godfrey-Smith, 2003). Se uma predição é falseada, de quem é a culpa? Do método experimental falho, da hipótese, ou da teoria que gerou a hipótese? O que garante a um cientista que a predição observável que ele fez de uma conjectura, a qual muitas vezes envolve conceitos abstratos, tem algum sentido? O que garante esta *materialização* da ideia contida na hipótese em uma predição observável (*i.e.* um problema de operacionalização de conceitos). A resposta de Popper foi que embora não possamos ter certeza do que está ocorrendo quando uma hipótese é falseada, isso não impede o cientista de investigar o que *causou* a falsificação por meio de novos ciclos hipotético-dedutivos (Gewandsznajder, 1989). Esta incerteza não impede o cientista de gerar novas questões e aprimorar seu conhecimento, pois é justamente essa abertura à crítica uma das características mais relevantes do método hipotético-dedutivo popperiano (Gewandsznajder, 1989).

Por último, Popper foi criticado por não ter conseguido responder claramente uma outra questão: uma falsificação experimental é suficiente para refutar toda uma teoria ou mesmo uma simples hipótese? Está é uma questão abordada com mais profundidade por outros filósofos que sucederam Popper, como seu aluno Imre Lakatos ou Thomas Kuhn, dentre muitos que poderiam ser citados (Chalmers, 1993; Godfrey-Smith, 2003). Não me aprofundarei nas propostas destes filósofos, porém considero importante descrever minimamente sobre o que suas propostas se referem.

Lakatos propõe a noção de programa de pesquisa formado por um *núcleo duro* ou *fundamental* e um *cinturão protetor*. O núcleo fundamental é composto pelos princípios básicos do corpo teórico, por suas leis e teorias mais gerais, os quais permanecem constantes ao longo de todo o programa de pesquisa (*i.e.* o núcleo de um programa de pesquisa é inquestionável e irrefutável). Este núcleo é envolvido pelo cinturão protetor, que contém as teorias específicas e as hipóteses testáveis e falseáveis, as quais são modificadas e substituídas frequentemente conforme o programa se desenvolve. Mais uma vez, Gewandsznajder (1989, p. 154) nos provê um bom exemplo sintético para descrever uma proposta filosófica, neste caso para mostrar como Lakatos explicaria o desenvolvimento de um aspecto particular da teoria newtoniana. Este filósofo diz,

*Este teria sido o modo de proceder de Newton, ao criar inicialmente um modelo de sistema planetário que desprezava a extensão do Sol e dos planetas e as forças interplanetárias. A seguir, tendo solucionado certas dificuldades matemáticas, sofisticou seu modelo, passando de massas puntiformes para massas esféricas. Levando em conta as forças interplanetá-*

*rias, corrigiu novamente o modelo, aplicando-o a planetas achatados nos polos, em vez de esféricos. Agindo assim, ele ignorou certos fatos que, pelo menos inicialmente, poderiam ser considerados como refutações ao seu modelo primitivo. Estes fatos eram tratados como anomalias e impedidos . . . de atingir os fundamentos de sua teoria. Eles atingiam apenas o cinturão protetor do programa, formado pelas hipóteses auxiliares que estabelecem as condições iniciais, pela ótica geométrica, pela teoria de Newton da refração atmosférica etc.. Finalmente, através . . . dos cálculos diferencial e integral, os modelos eram progressivamente sofisticados, de forma a explicar as anomalias.*

No entanto, ao aceitarmos a proposta de Lakatos, como podemos explicar a substituição de grandes teorias que observamos na história, como por exemplo a substituição da mecânica clássica newtoniana pela teoria da relatividade de Einstein? A resposta de Lakatos foi que os programas de pesquisa se degeneram a partir do momento em que o núcleo fundamental não consegue mais ser *suportado* por nenhuma nova conjectura auxiliar que os cientistas elaborem (novas hipóteses são continuamente rejeitadas, estagnando o programa). Lakatos assume que, nestas situações, as modificações na teoria passam a ser *ad hoc*, servindo apenas para salvar o núcleo de um programa de pesquisa degenerado (Gewandsznajder, 1989). Sendo assim, o programa de pesquisa passa a a ser definido por um núcleo que não consegue mais dar conta de explicar as questões de interesse do pesquisador. Este núcleo passa a ser rejeitado, precisando ser substituído por outro núcleo, portanto por um novo programa de pesquisa. Segundo Gewandsznajder (1989, p. 154), isto ocorrerá quando “*houver um programa de pesquisa rival que explique o êxito do programa anterior e que demonstre uma maior . . . capacidade de prever fatos novos*”.

Thomas Kuhn, por sua vez, é tido como um filósofo de posição relativista (Chalmers, 1993). Este filósofo considera a ciência como um processo social que pode, portanto, ser descrito por revoluções marcadas pela quebra e subsequente alteração dos paradigmas que definem uma dada área de conhecimento. Semelhante, mas não igual, ao núcleo duro do programa de pesquisa de Lakatos, o conceito de paradigma de Kuhn é definido por um conjunto de teorias fundamentais que, se refutadas, desestruturam toda a base de conhecimento teórico referente a algum assunto de relevância científica. Para Kuhn, o que determina as revoluções científicas são fatores sociais relacionados a como o novo paradigma é aceito não apenas pela comunidade científica, mas pela sociedade como um todo (Chalmers, 1993). Portanto, para Kuhn, não é por um processo puramente objetivo que o conhecimento científico avança, como Lakatos procurou alegar<sup>23</sup>.

---

<sup>23</sup>Embora eu não tenha, nesta tese, aprofundado-me nas proposições e críticas relativas às vertentes filosóficas *sociais*, este é um tema de suma importância, cuja introdução pode ser lida nos livros que venho citando ao longo de todo este capítulo: Chalmers (1993), Gewandsznajder (1989) e Godfrey-Smith (2003).

Ao aceitarmos que a ciência possui um componente histórico-social que a define, abrimos possibilidade para a formação de culturas científicas. Assim, podemos considerar que a ciência é uma atividade polimórfica, formada por grupos que compartilham interesses, problemas e formas similares de resolver esses problemas. Como (Keller, 2003) nos propõe, a ciência é formada por culturas epistemológicas distintas que definem suas próprias normas para atribuir o que é ou não válido como conhecimento. Esta autora nos mostra que é comum observarmos diversidade cultural mesmo dentro de uma área mais específica do conhecimento científico, como a embriologia ou a biologia do desenvolvimento. Se retornarmos o que foi apresentado no capítulo anterior, veremos que este é também o caso da ecologia, uma disciplina que se originou de modo polimórfico, em várias subdisciplinas que se dedicaram a entender “*as condições da luta pela existência*”. Dito de outra forma, como pode haver tanta diversidade em um mundo onde as espécies *lutam* entre si para se manterem no ambiente<sup>24</sup>? Concluo esta seção dizendo que os problemas epistemológicos não podem ser resolvidos por meios racionais inequívocos. Nenhum filósofo foi (e creio que nem será) capaz de prover uma solução epistêmica mágica que garanta, sem falhas, a obtenção de conhecimentos absolutamente verdadeiros. Popper, talvez, tenha chegado próximo de um consenso, porém seu método está longe de ser infalível ou perfeito. Portanto, parece-me precipitado querer descredenciar a cientificidade de um campo de conhecimento simplesmente porque não ele segue à risca uma *receita* pré-estabelecida de como fazer ciência<sup>25</sup>.

## 2.4 Busca por generalizações e a discussão do caráter nomológico da ecologia

Antes de expressar minhas conclusões sobre a problemática geral da epistemologia farei uma breve síntese sobre o problema nomológico na ecologia. Com isso, pretendo aproximar mais o leitor de um problema fundamental da epistemologia que penetrou no campo específico da ecologia. O conceito de generalidade, como venho mostrando, está presente em qualquer episteme debatida até o momento nesta tese, desde o indutivismo ingênuo, ao dedutivismo puro, passando pelo hipotético-dedutivismo. Arrisco-

---

<sup>24</sup>Neste momento, não estou proferindo que estas duas definições de ecologia esgotem sua matéria. Elas são apenas exemplos de modos gerais de se definir o problema da ecologia, dentro das quais diferentes culturas se formarão na tentativa de propor resoluções para o problema.

<sup>25</sup>Uma discussão mais completa desta concepção pluralista de ciência será apresentada no capítulo 4.



me a dizer que esta parece ser uma grande necessidade heurística do cientista, pois este depende de generalizações para *decifrar* satisfatoriamente os complexos padrões da natureza, assim como para explicar ou descrever possíveis processos que estejam em jogo na geração desses padrões (El-Hani, 2006). Contudo, existem muitas confusões no uso e interpretação tanto do conceito de generalidade quanto o de lei geral, o que, a meu ver, dificulta uma compreensão minimamente adequada para o problema de demarcação da ciência. A problemática nomológica na ciência é um dos pontos mais controversos em termos epistemológicos (El-Hani, 2006). Ela começa com questões muito fundamentais e para as quais não há resposta assertiva. Porque devemos nos basear em uma ideia de lei para prover explicações ou descrições científicas? Porque devemos conceber que a natureza é regida por algo como um princípio fundamental? Não me atreverei a resolver estas questões, as quais foram devidamente discutidas por El-Hani (2006) no contexto da ecologia. Nesta seção, descreverei apenas alguns problemas associados aos conceitos de lei geral e de generalidade para mostrar que o cientista que usa estes conceitos para definir o que é científico ou não comete um grande engano. Devo deixar claro que não estou dizendo que uma abordagem nomológica seja inválida, mas apenas que não é uma concepção epistemológica nomotética que torna científico um determinado campo do conhecimento. Para expor meu argumento, retomarei alguns aspectos específicos já discutidos anteriormente nesta tese, assim como anteciparei, em linhas bem gerais, alguns temas relacionados ao processo de modelagem, que serão abordados especificamente no próximo capítulo<sup>26</sup>. Especificamente, minha argumentação será fundamentada em como estes problemas se manifestaram na ecologia, embora a física eventualmente seja colocada em pauta, afinal, muito dessa discussão decorre de definições científicas que tem a física como referência. Procurarei esclarecer algumas destas confusões retomando, para isso, as perspectivas de Murray e Peters<sup>27</sup>.

Relembrando, a ideia central de Murray é que a ecologia ainda não é uma ciência pelo fato de não possuir um corpo teórico nomológico. Estendendo seu raciocínio, Murray considera que isso não impede que um dia esta área do conhecimento venha a se tornar científica, mas argumenta também

---

<sup>26</sup>Devo destacar também que, nesta seção, abusarei das citações literais a El-Hani (2006), pois considero que este autor provê explicações muito lúcidas e coerentes com minha perspectiva para este assunto de extrema complexidade. Sem dúvida, algumas afirmações El-Hani sintetizam muito bem o que eu gastaria muito uma quantidade muito maior de palavras para explicar.

<sup>27</sup>Escolhi estes dois autores porque eles apresentam pontos de vista que podem ser considerados radicalmente opostos em relação a como o conceito de lei geral e de generalidade deve ser encarado na ciência (ênfasis a leitura de El-Hani, 2006, para aqueles interessados em uma análise aprofundada do tema). Propostas radicalmente opostas de resolução de um mesmo problema geralmente refletem alguma concepção inadequada de algum(ns) conceito(s) envolvido(s) na proposta. Minha intenção é deixar esta ideia clara nesta seção.

que se os biólogos continuarem com uma relutância psicológico-formacional em aceitar o raciocínio nomológico estarão fadados a permanecerem à margem da ciência (Murray Jr., 2001; El-Hani, 2006).

Isto fica explícito quando ele afirma que:

*I have no doubt that when biologists acquire some courage and start their search for explanation by believing that universal laws are possible in biology, rather than thinking them impossible, their imaginations will kick in, and theoretical ecology and evolutionary biology will be transformed from being unpredictable soft sciences to predictive hard sciences.*

*(Murray, 2000, p. 403)*

Considero que a visão de Murray possui pelo menos dois problemas graves. Primeiro ele afirma que a biologia não tem leis universais, uma alegação que outros autores que compartilham de seu pensamento fazem de maneira mais branda, dizendo que a biologia tem *poucas* leis gerais. Segundo, ele alega que a biologia necessita de leis universais como as da física. Adiante, criticarei conjuntamente esses dois problemas do argumento de Murray, afinal eles estão fortemente interligados.

A discussão nomológica na ecologia é muito capciosa, pois precisamos primeiro entender o que é uma lei universal ou uma lei geral, conceitos cujos termos carregam um alto peso semântico tornando a interpretação da episteme dedutivo-nomológica confusa e controversa. Para Hempel, como mencionado na seção 2.3, uma lei universal é aquela que vale para qualquer local e em qualquer momento da história do universo. Esta definição é muito restritiva e, talvez, nenhuma lei proposta até hoje tenha essas propriedades, o que nos obriga a reconhecer a existência de níveis de generalização (*cf.* El-Hani, 2006, para uma explicação detalhada deste conceito). Não se pode esquecer que o raciocínio dedutivo-nomológico só “funciona” se leis vierem acompanhadas de outras premissas condicionais (Hempel e Oppenheim, 1948). Ora, se é necessário que condicionemos as leis para que elas valham, como elas podem ser universais? A lei gravitacional de Newton só é universal se vier acompanhada de uma série de outras premissas adicionais. Por exemplo, a predição de que qualquer corpo solto a uma dada altura do solo irá cair em decorrência da *lei da gravidade* só valerá se considerarmos também a premissa de vácuo, o que por sua vez já impõe uma restrição ao mundo possível onde a lei se aplica<sup>28</sup>. Ou seja, a rigor, o uso do termo *universal* mais confunde do que ajuda em enfatizar a necessidade de generalizações.

---

<sup>28</sup>Imagine que alguém tem um objeto desconhecido dentro de um saco e que soltara este corpo de uma certa altura do solo esperando que, se a lei gravitacional for verdadeira este objeto cairá. Suponha que o corpo contido dentro do saco fosse uma ave viva. Neste caso, se abrirmos o saco, o objeto de dentro dele voaria e não cairia no solo, contrariando a predição da lei. Para que a lei *funcionasse*, deveríamos impor uma condição (que poderia ser o vácuo, o que tornaria a lei intestável, pois não conseguimos produzir vácuo absoluto para testar a hipótese) adicional à lei, por exemplo que o corpo dentro do saco tem que ser matéria não viva.

Continuando a questão semântica, considero também que *lei* é um termo que traz consigo a ideia de algo que deve ser seguido sem avaliação crítica. De fato, este é o procedimento lógico que deve ser adotado quando lidamos com o raciocínio dedutivo; suas premissas são inquestionáveis. Entretanto, este procedimento é o mesmo para qualquer outra premissa do argumento que não contenha o *status* de lei. No caso da queda livre mencionado acima, a condição inicial de vácuo exemplifica muito bem o problema, pois esta condição não é uma lei. Assim, não é a questão da inquestionabilidade que está em jogo na interpretação que o cientista quer dar ao termo *lei*. O conceito de lei da natureza, refere-se a princípios que regem os fenômenos naturais em geral, recaindo no problema de domínio de aplicação das teorias discutido no parágrafo anterior.

Discutida a questão terminológica, podemos continuar afirmando que a biologia não possui leis gerais ou universais como querem alguns físicos tradicionais? No capítulo 1 mencionei diversas afirmações com caráter de lei universal para a biologia, que vem sendo usadas desde o século XIX. Por exemplo, a lei que diz que toda célula vem de outra célula, a lei que todo organismo nasce e morre, a lei que todo ser vivo depende de água para existir; todas estas leis se aplicam a qualquer ser vivo do planeta (*cf.* Turchin, 2001, 2003, para uma discussão elegante no tema, porém centrada nas leis da ecologia de populações). A meu ver estas afirmações tem a mesma força nômica da lei da inércia. Em relação ao argumento de que a física teria muito mais leis universais que a biologia, com pouquíssimas delas, eu fico com a seguinte dúvida: quantas leis são necessárias para que uma teoria seja considerada geral e científica? Usando o raciocínio nomológico, parece-me mais sensato que tenhamos poucas leis gerais, pois se tivermos que descobrir uma quantidade muito grande de leis, o que estaríamos fazendo é *generalizando* situações particulares, o que é incoerente. Em outras palavras, se existem leis gerais ou universais, poucas delas deveriam ser suficientes para explicar todos os padrões e fenômenos naturais. Fica claro mais uma vez que o raciocínio nomológico invoca generalidades constritas, isto é, as leis gerais da natureza que os cientistas descrevem se aplicam a um domínio definido, que pode ser grande ou pequeno a depender do problema em jogo e da teoria proposta. Portanto, ao propor enunciados gerais que valem para todos os seres vivos, os biólogos simplesmente estão fazendo generalizações equivalentes à dos físicos.

Continuarei minha crítica voltando minha atenção agora ao segundo problema, a necessidade nomológica da ciência. Meu argumento sobre esta alegação será desenvolvido continuamente ao longo desta tese, sendo que, aqui, apresentarei uma rápida síntese desta grande controvérsia que ainda assombra a ecologia. Como vimos, definir o que é lei não é tão simples. Por outro lado, creio que nenhum cientista

ou filósofo atualmente discorde que nossas explicações sobre a natureza são mais abrangentes e mais profundas quanto mais geral for a teoria que embasam essas explicações. Portanto, visar generalizações é uma atitude desejável e não é este o problema. Entretanto, visto que existem vários níveis de generalização que podem ser atribuídos às teorias e dado que o *universo* do biólogo (assim como muitos dos problemas destes cientistas) têm um domínio mais restrito que o do físico, não seria justo dizer que a ecologia não é ciência pois carece de leis universais. Considero mais sensato pensar como El-Hani (2006, p. 20) que diz:

*Em vez de uma filosofia da ciência monolítica, que busca derivar do modelo da física cânones para todas as ciências, temos hoje uma diversidade de filosofias das ciências, que procuram compreender as particularidades de cada grande ramo da empreitada científica, ainda que se possa sustentar uma unidade da ciência – que, em minha visão, se dá muito mais no plano axiológico, em termos de um conjunto de valores que todas as comunidades científicas compartilham, do que num plano epistemológico e metodológico.*

A meu ver, um dos aspectos mais importantes do raciocínio dedutivo-nomológico é o que podemos derivar das leis gerais enunciadas (que geralmente são afirmações de baixo conteúdo informativo, como todos os indivíduos nascem e morrem), pelo menos no que concerne às generalizações biológicas. A partir de uma situação hipotética e genérica, os usuários do raciocínio nomológico acabam derivando consequências mais específicas e precisas das leis que regem os fenômenos em estudo. Creio ser esta a ideia que deva estar em mente quando pensamos em usar um raciocínio dedutivo-nomológico; nada a mais que isso (*i.e.* usar essa ideia para inferir a cientificidade de algum corpo teórico de conhecimento). Foi assim na ecologia de populações, por exemplo, com a proposição da lei de crescimento exponencial (Turchin, 2001). Esta lei representa um caso de *força-zero*, como muitos teóricos costumam se referir às leis que consideram apenas os processos mais basais que podem afetar o sistema (no caso citado, apenas nascimentos e mortes afetam a dinâmica populacional; Turchin, 2001). A observação de que na natureza nenhuma população cresce indefinidamente levou à hipótese de que haveria alguma *força* que impediria o crescimento exponencial das populações (esta discussão será detalhada no capítulo seguinte). Mantendo o critério de simplicidade, Verhulst derivou o modelo logístico, uma formulação considerada mínima para o novo problema (*i.e.* limitação do crescimento), porém com uma complicação adicional, a denso-dependência linear na taxa de crescimento da população. Com esse modelo, foi possível prever uma capacidade suporte da população, ou seja, um tamanho máximo que a população atinge dada as condições iniciais e as taxas de denso-dependência (Turchin, 2003). Além da aplicabilidade deste aspecto heurístico da episteme nomológica na ecologia, Turchin (2001) também revela mais duas importantes leis

ecológicas, demonstrando a fragilidade do argumento de Murray<sup>29</sup>.

O outro lado da controvérsia nomológica na ecologia que venho discutindo é representado pela proposta de Peters. Retomando sua perspectiva, Peters diz que deveríamos abandonar completamente o raciocínio dedutivo-nomológico na ecologia, dentre outros motivos, porque as teorias sustentadas por esse raciocínio são tautológicas, portanto desprovidas de conteúdo testável. Segundo Cooper (2003, p. 137–8), o cerne da proposta de Peters se fundamentou nos seguintes argumentos:

*(1) the tradition fails miserably when measured against the standard of predictive efficacy, the only standard for successful science; (2) the theoreticians' claims that their models have explanatory power and increase our understanding of ecological phenomena cannot be sustained; (3) the fruits of this tradition are empty tautologies; and (4) this tradition operates with concepts that cannot be operationalized, and thus with theories that cannot be tested in hypothetico-deductive fashion.*

Percebemos novamente que trata-se de uma perspectiva que radicaliza, portanto, restringe o conceito de ciência. Embora tenha procurado se restringir à ecologia, Peters não tem como se esquivar de fazer ao mesmo tempo uma crítica à física, já que seus argumentos são críticas gerais ao raciocínio nomológico. Para esclarecer este meu ponto de vista, concentrarei minha análise nos pontos (1) e (4), porém sem ignorar os outros dois.

Peters se concentra apenas no componente preditivo da ciência, invocando o conceito de *eficácia* para dizer que a episteme dedutivo-nomológica é ineficiente em suas previsões, o que parece-me minimizar, injustamente, o componente criativo da atividade científica que ocorre durante a sua fase conjectural. Lembremos que foi Popper quem nos alertou da relevância desses dois componentes do *método* científico hipotético-dedutivo, o que torna a fundamentação popperiana do argumento de Peters no mínimo frouxa<sup>30</sup>. Este ponto se junta à questão sobre o que é testável ou não na ciência, sobre o que é operacionalizar. Peters diz que muitos conceitos provenientes de teorias nomológicas não podem ser operacionalizados para serem testados pelo método de Popper. Esta etapa do processo científico que envolve a transformação de conjectura em previsões observáveis não tem como ser feita sem usarmos algum critério arbitrário para decidir o que uma boa materialização de uma ideia, *i.e.* operacionalização de um conceito. Parece-me que este é um aspecto da ciência que o cientista encontra-se preso a convenções sócio-culturais, principalmente quando os conceitos envolvidos são abstratos e não obser-

---

<sup>29</sup>Devo notar que Murray contesta o raciocínio de Turchin e não considera nomológica a proposta deste, embora eu ainda não consiga entender claramente os argumentos de Murray para isso (*cf.* Murray Jr., 2001; El-Hani, 2006).

<sup>30</sup>Peters considerava-se popperiano e afirmava que sua perspectiva epistemológica seguia os ensinamentos de Popper. Este argumento, a meu ver, é falho.

váveis. Esta idéia fica mais clara se considerarmos dois conceitos fundamentais, um da física e outro da biologia: átomo e espécie. O átomo é uma entidade não observável da matéria necessário para dar coerência à teoria desenvolvida pelos físicos e que, historicamente, foi representado de várias formas até que se chegasse no modelo de átomo que temos hoje. Este conceito abstrato, o átomo, foi o meio que os físicos deram para formular teorias coerentes para explicar os fenômenos que estudavam (*e.g.* os eletromagnéticos e termodinâmicos), assim como fundamenta a teoria geral da química. Algo similar ocorre com o conceito de espécie para o biólogo. Espécie é um conceito abstrato, que procura tipificar os seres vivos de acordo com suas similaridades e/ou distinções. Aparentemente, este conceito parece ser facilmente observável pois conseguimos distinguir sem muito esforço um macaco de um peixe. Contudo, nem sempre as diferenças entre as espécies são tão claras quanto as observadas entre um macaco e um peixe. Quando restringimos o nível taxonômico para o nível de gênero, a identificação visual de duas espécies pode ser impossível<sup>31</sup>. Definir o conceito de espécie também fica problemático quando entramos na escala dos microrganismos, onde a dificuldade em se distinguir tipos diferentes aumenta muito (espécies de bactérias muitas vezes só são distinguíveis por meio de ensaios citológicos ou por técnicas moleculares).

Resumindo a longa digressão acima, os biólogos adequaram o conceito abstrato de espécie aos distintos problemas em que seu uso foi necessário, elaborando definições variadas do conceito, como a biológica e filogenética para citar apenas dois exemplos. Portanto, juntando os exemplos da física e da biologia, parece-me no mínimo precipitado alegar que a ecologia, tal qual concebida pelos teóricos tradicionais, é fundamentada em conceitos não operacionalizáveis. Se isso fosse verdade, porque os físicos tiveram tanto sucesso em sua empreitada nomológica?<sup>32</sup> Esta é uma pergunta sem resposta satisfatória e que atormenta os filósofos da ciência e os cientistas interessados no assunto há décadas<sup>33</sup>. O que deve ficar de Peters é que existem outros modos de se fazer ciência ecológica sem que o cientista tenha que usar obrigatoriamente um raciocínio dedutivo-nomológico. Neste sentido, sua visão instrumentalista da ciência, em que teorias são ferramentas para se predizer padrões observáveis da natureza, é útil e interessante. Porém, essa perspectiva deve ser adotada com o devido cuidado para que não se incorra nos

---

<sup>31</sup>Os mastozoólogos enfrentam comumente este problema quando tentam identificar algumas espécies de roedores que só se distinguem citogeneticamente.

<sup>32</sup>o argumento de Murray me parece mais sensato para este ponto do debate; não é porque ainda não atingiu um nível preditivo que satisfaça um ou outro cientista, que a ecologia não poderá atingí-lo.

<sup>33</sup>Não entrarei em detalhes dessa discussão nesta tese, pois fugirá muito do tema central e minha opinião seria somente especulativa.

problemas discutidos acima.

Um último aspecto entre a dicotomia Murray-Peters que quero ressaltar é a ambiguidade na interpretação do método hipotético-dedutivo de Popper entre estes dois autores. É curioso pensar que os dois autores se diziam popperianos, sendo uma clara evidência de como a filosofia de Popper foi interpretada de variadas formas pelos que o sucederam. O que vimos foi Murray enfatizando a parte conjectural da ciência em seu argumento<sup>34</sup> e Peters favorecendo a parte inferencial da ciência. O fato é que neste caso, a filosofia popperiana não rejeita as características veneráveis de ambas as epistemes dos autores supramencionados, embora Popper manifeste maior entusiasmo por teorias explanatórias, como Murray define as teorias com base nomológica. A visão de Peters é interpretada por Murray como uma abordagem indutivista que o cientista usa (ou estaria autorizado a usar) em estágios iniciais do desenvolvimento teórico de uma disciplina científica, pois geralmente são nesses momentos que as investigações tem um caráter descritivo (*i.e.* suas conclusões são derivadas de teorias desprovidas de uma base em leis universais; Murray Jr., 2001). Esta me parece uma visão depreciativa e simplista da episteme de Peters<sup>35</sup>. Portanto, considero que estes vieses interpretativos do método popperiano é uma das principais confusões que promovem uma controvérsia infundada, que gerou um debate, a meu ver, prejudicial ao desenvolvimento teórico na ecologia por disseminar perspectivas equivocadas que foram tomadas sem critério por muito ecólogos.

Arrematando os diversos pontos discutidos nesta seção, sugiro que a noção de leis universais seja descartada e substituída por uma definição menos rígida de generalidade que reconhece níveis de generalização. Talvez o termo *princípio geral* seja suficientemente adequado. Isso ajudaria a evitar confusões desnecessárias atreladas ao peso semântico carregado pelos termos *lei* e *geral*, tanto no senso comum, quanto entre aqueles que pertencem ao *círculo acadêmico*<sup>36</sup>. Ademais, enfatizo que o mais importante

---

<sup>34</sup>Porém, sem negar a questão do teste de hipótese que também é importante para ele.

<sup>35</sup>Creio que El-Hani (2006, p. 26), sintetiza muito bem essa discussão ao dizer que “*Murray se equivoca, contudo, por não ter considerado as implicações da distinção entre contexto da descoberta e contexto da justificação para o argumento de Peters. Para descobrir ou propor uma generalização, não há problema algum em usar indução a partir de uns poucos casos. Embora a indução tenha sido descartada por Popper como um procedimento de verificação, no caso da descoberta, Popper é enfático em afirmar que ela não está sujeita aos métodos. Portanto, nada proíbe que se derive uma generalização por indução. Contudo, esta generalização precisará ser testada, no contexto da justificação, mediante a busca de evidências adicionais, independentes daquelas usadas em sua proposição. ... Em suma, não me parece que Peters tenha interpretado Popper equivocadamente ... exatamente por causa de um aspecto que, curiosamente, o próprio Murray menciona posteriormente em seu artigo: ‘Não há regras ou métodos que garantam a descoberta’ ([2001], p. 262)*”.

<sup>36</sup>Embora definições de senso comum ou de dicionário devam ser evitadas na ciência, é importante não descartá-las totalmente, pois estas definições podem ser usadas como uma base inicial a partir da qual definições mais

para a adoção de uma perspectiva sensata do problema nomológico na ecologia é reconhecer os limites das generalizações contidas em nossas conjecturas e nos testes empíricos de nossas hipóteses. Esta não é uma tarefa simples nem fácil, porém nos ajuda a definir os domínios de aplicação de nossas teorias (*i.e.* até onde nosso conhecimento pode chegar? Que níveis de generalização podemos fazer do sistema em estudo?). Concluo, portanto, que esta concepção em níveis do conceito de generalidade é sem dúvida um dos principais pontos que devem ser fortalecidos no pensamento dos ecólogos. Desta forma, o ecólogo não será apenas capaz de delimitar, com mais clareza, os domínios de suas teorias, mas também terá uma boa oportunidade para investigar em que partes os domínios de aplicação de diferentes teorias se sobrepõem e em que partes eles se excluem (El-Hani, 2006, p. 18).

## 2.5 Síntese das controvérsias epistemológicas

Após esta longa reflexão epistemológica, chego ao ponto de proferir minhas conclusões. Neste capítulo, procurei mostrar que o pensamento científico passou por uma profunda transformação após o século XV, quando a experimentação e a observação começaram a ser extremamente valorizadas como meio pelo qual o cientista justifica a verdade de suas proposições. Porém, se pudermos dizer que existe uma *forma* atual de se pensar a ciência que possa ser descrita verbalmente, considero que o amadurecimento desta *forma* ocorreu no século XIX, um período que, a meu ver, poderia ser qualificado como uma segunda revolução científica. Dentre as grandes transformações intelectuais ocorridas neste período, destaco três: i) a biologia, como mostrei no capítulo anterior, se consolida como uma nova disciplina das ciências naturais que se propõe a responder questões bem distintas das da física; ii) os cientistas passaram a desenvolver muitas teorias baseadas em conceitos abstratos como a teoria eletromagnética (que envolve conceitos tais quais os de eletricidade, magnetismo e elétron) ou a teoria da origem das espécies (envolvendo o conceito de evolução; Laudan, 1981; Chalmers, 1993; Gewandsznajder, 1989). Estas teorias contribuíram sobremaneira para a disseminação de um projeto de ciência baseado na *tese auto-corretiva* (Laudan, 1981); iii) uma teoria da probabilidade foi formalizada<sup>37</sup>, culminando com a *fundação* da estatística moderna com Pearson no final do século (Salsburg, 2001) e apoiando a visão probabilificacionista

---

rigorosas e precisas de alguns conceitos complicados podem ser derivados, e explicados a alguém que vem de fora do contexto em que o conceito foi elaborado.

<sup>37</sup>Considera-se que essa formalização decorre, principalmente, dos trabalhos de Laplace, Gauss e Quetelet.



de alguns empiricistas lógicos, como Carnap no século XX. A visão probabilística de mundo veio quebrar a perspectiva determinística, predominante desde as origens do pensamento científico e este tópico será mais discutido, no capítulo seguinte.

Essas transformações, dentre muitas outras que poderiam ser citadas, impactaram profundamente a forma como a atividade científica é interpretada, não somente pelos próprios filósofos e cientistas, mas também pelo senso comum, popular. Por muito tempo, duas questões fundamentais entre os filósofos da ciência foram: há um método que define inequivocamente a prática científica e, caso ele exista, qual seria esse método? A resposta a esta questão está intimamente atrelada às respostas que podemos dar à duas das questões que motivaram toda a problemática discutida neste capítulo (seção 2.1) – o que é um conhecimento científico válido? Como os cientistas fazem para obtê-lo?

Ao longo de minha reflexão procurei mostrar que não há unanimidade a respeito da existência de um método científico único e infalível. Para isso, iniciei minha exposição mostrando que a epistemologia, ao procurar meios racionais para descrever o conhecimento científico, se depara logo de cara com um problema fundamental: os raciocínios elementares (*i.e.* dedutivo e indutivo) falham em prover justificativas inequívocas sobre a verdade das crenças ou dos argumentos de um cientista. A constatação de que não há mecanismos racionais que permitam garantir a verdade de uma crença não impediu o avanço da ciência, pois os cientistas continuam se adaptando aos limites impostos pela racionalidade. É, portanto, na busca por compreender as minúcias desta limitação e suas consequências para a prática científica que os filósofos da ciência dedicam grande parte do seu tempo. Afinal, só assim seria possível definir propriedades da ciência que a distinguiriam de outro tipo de atividade que vise transmitir alguma forma de conhecimento. Analisando a literatura epistemológica das últimas décadas, alguns autores nitidamente consideram que, até o momento, Popper foi quem melhor resolveu esse problema de demarcação com seu método hipotético-dedutivo falsificacionista (*e.g.* Gewandsznajder, 1989). Creio que não seria um exagero dizer também que existe um certo consenso entre os cientistas a esse respeito. Realmente, Popper contribuiu com noções muito relevantes ao debate epistemológico, porém este filósofo não foi capaz de dar uma resposta definitiva para os problemas fundamentais da filosofia da ciência<sup>38</sup> (seção 2.3).

---

<sup>38</sup>A rigor, Popper estaria sendo extremamente contraditório a si mesmo caso tivesse se proposto resolver definitivamente este problema. Toda sua teoria epistêmica se baseia no conceito de conjectura e elaboração de hipóteses. Desta maneira, sua própria proposta metodológica deve ser encarada como uma conjectura que pode se mostrar falsa futuramente. No entanto, esta argumentação é apenas um exercício mental, já que seria muito difícil, se não impossível, testar o método popperiano na prática.

Diante do que discuti nas seções anteriores, considero legítimo concluir que um grande tema problemático na epistemologia foi responder porque boa parte dos filósofos se dedicaram a uma busca incessante pela descrição de um único método, soberano, composto por um conjunto de regras claras e eficientes que pudessem caracterizar os procedimentos a serem praticados em qualquer investigação científica inequivocadamente. Embora Popper não alegasse que sua proposta fosse infalível ou a única capaz de gerar conclusões científicas aceitáveis, não é muito claro se foi realmente essa a interpretação que muitos cientistas deram ao método popperiano<sup>39</sup>. É inegável que a proposta popperiana contém diversas noções gerais que podem ser consideradas como princípios fundamentais que deveriam estar presentes em qualquer atividade científica contemporânea (*e.g.* as noções de falsificacionismo, de teorias como conjecturas abertas à críticas, de uma ciência auto-corretiva). No entanto, há muita controvérsia a respeito da necessidade científica de outras proposições de Popper como a de que quanto maior for a generalidade de uma teoria mais sujeita ela estará aos riscos de refutação e, por isso, melhor seu poder preditivo, ou mesmo a necessidade de teorias serem capazes de fornecer hipóteses testáveis – um aspecto essencial do método popperiano<sup>40</sup> (Godfrey-Smith, 2003). Portanto, embora não seja possível dizer que a ciência possui um método único e bem definido, isso não nos impede de dizer que há propriedades que caracterizam, mesmo que grosseiramente, a atividade científica.

Muitos conceitos usados pelos filósofos não possuem uma definição rígida ou categórica quando aplicados no dia a dia de um cientista, ou seja, na vida real de um pesquisador. O conceito de racionalidade é um deles. Venho insistindo em dizer – espero ter conseguido mostrar – que os cientistas, tampouco os filósofos, não foram capazes de prover uma definição precisa, simples e inequívoca de ciência. O fato é que se adotamos uma postura que reconhece que a ciência ainda não dispõe de métodos garantidos, mas que ela deveria sempre buscar a verdade em seus procedimentos, não podemos ignorar o papel da subjetividade na atividade de um cientista enquanto este método inequívoco e infalível não for apresentado. Enfim, parece-me sensato assumir uma postura que concebe a ciência como uma atividade humana em plena evolução, em que o *racional* é a interação e o diálogo entre os cientistas na tentativa de chegarem em acordos consensuais em suas controvérsias (muitas delas infundadas). Esta

---

<sup>39</sup>Por exemplo, muitos cientistas ainda usam o teste de hipóteses com intenções de confirmação ao invés de refutação teórica (Gewandsznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003)

<sup>40</sup>Para o caso de teste de hipóteses, poderíamos dizer que esta é uma necessidade das ciências naturais, já que a matemática não carece obrigatoriamente deste procedimento para propor teorias válidas (seção 3.2). Ainda podemos questionar mesmo se algumas teorias na física ou na biologia devem ser testadas devido à limitações práticas que dificultam muito o delineamento de testes adequados. Por exemplo, como testar a lei da inércia ou a lei de crescimento exponencial de populações (Turchin, 2001)?

é uma recomendação fundamental que faço aos cientistas (especialmente aos ecólogos dado o escopo desta tese). Considero que só assim, aqueles que creem numa ciência racional absoluta poderão atingir essa *racionalidade* (caso ela realmente exista ou seja relevante) ou poderão se conscientizar de que este conceito de razão plena é ilusório. Abaixo, esclarecerei minha posição neste debate.

Em meu ponto de vista, quaisquer definições de ciência que não levem em conta os aspectos histórico-sociais, psicológicos e pedagógicos da atividade científica serão, no mínimo, incompletas. Vejamos brevemente um aspecto importante da história do século XIX que me ajudará a esclarecer meu ponto de vista, a disseminação da filosofia positivista de Auguste Comte. No início do século XIX, Comte chegou com uma proposta político-social, a meu ver, bastante radical, baseada em uma filosofia que denominou de positivismo. Resumidamente<sup>41</sup>, pela doutrina de Comte, o pensamento científico e empírico deveria nortear as tomadas de decisão em qualquer esfera social. Comte buscava entender as leis que regiam os fenômenos sociais (Arruda, 1991) e para isso considerava que qualquer tipo de conhecimento humano passa por três estágios históricos: o teológico ou mítico, o metafísico e o científico (ou positivo) (Pearson, 1900). Percebe-se que Comte desvalorizou a metafísica (um ramo da filosofia que os lógico-positivistas do século XX fizeram questão de repudiar veementemente; Godfrey-Smith, 2003), claramente considerada como um estágio inferior do conhecimento humano, porém inevitável historicamente. Para este filósofo, qualquer decisão social, política ou individual deveria ser justificada em fatos observáveis e analisados cientificamente (um tema que foi recorrente nesse capítulo), o que a meu ver implanta definitivamente uma noção *engessada* de racionalidade na discussão metodológica das ciências. Finalmente, o último aspecto da filosofia de Comte que quero destacar é sua classificação hierárquica das ciências, em que a matemática é colocada na base e a moral no topo (Pearson, 1900)<sup>42</sup>. Com isso, Comte assume que a progressão do conhecimento científico nos conduz inevitavelmente ao conhecimento dos verdadeiros valores morais. Apesar de ter se disseminado bastante no século XIX, esta alegação de Comte é muito forte, causando também muita controvérsia<sup>43</sup> (Laudan, 1971).

---

<sup>41</sup>Para uma reflexão mais aprofundada sobre o impacto do positivismo de Comte na ciência, recomendo a leitura de Laudan (1971).

<sup>42</sup>Apesar de empiricista forte, Pearson não compartilhava desta classificação científica de Comte. De acordo com Pearson (1900), "... *in some respects science owes a debt of gratitude to Comte, not indeed for his scientific work, nor for his classification of the sciences, but because he taught that the basis of all knowledge is experience and succeeded in impressing this truth on a certain number of people not yet imbued with the scientific spirit, and possibly otherwise inaccessible to it*" (p. 508). Em seguida, Pearson faz o seguinte comentário: "*The hierarchy of the sciences thus postulated suffices in a very obscurely stated manner to guide the Positivist in the subdivision of each special science*" (p. 508-509).

<sup>43</sup>Como bem notado por (Fausto, 2002), a filosofia positivista orientou posições políticas militares e ditatoriais

No âmbito científico, o ideal positivista exerceu uma forte influência. Como destaquei acima, a ideia de empiricismo, de comprovação com base na experiência observacional e *evolução* em busca da *verdade* passou a ser adotada por muitos filósofos e cientistas da época. Creio, em formato conjectural, que o motivo da ampla disseminação da noção de conhecimento científico inequívoco, único capaz de prover a verdade sobre o mundo, seja a assimilação da filosofia positivista pelos cientistas europeus do século XIX. Entretanto, vale notar que não há uma justificativa baseada em algum critério racional para o amplo aceite da proposta de Comte entre os filósofos e cientistas de sua época Laudan (1971). Embora a doutrina positivista não exerça influência direta no pensamento científico contemporâneo, parece-me que seus resquícios ainda podem ser encontrados indiretamente no pensamento de muitos cientistas de hoje, principalmente daqueles que assumem uma posição *racionalista* extrema.

Ora, se não podemos ter garantias absolutas sobre a verdade de algum conhecimento, como venho argumentando até aqui, que argumentos teremos para justificar que a ciência é uma atividade que independente de subjetividade? Qual é o argumento que Comte – ou qualquer outro filósofo nos fornece – nos dá que nos *obrigue* a usar o seu método ou episteme científica? Estas decisões claramente tem um componente subjetivo, pois levará em conta tanto aspectos psicológicos relacionados à cognição e ao aprendizado que definirão predileções individuais<sup>44</sup>, tanto quanto aspectos históricos relacionados à formação intelectual do cientista. Por fim, gostaria de ressaltar que a pedagogia tem um o papel crucial na definição popular e acadêmica de ciência. A perpetuação do conhecimento científico necessita da contínua educação de novos cientistas. Dependendo da pedagogia utilizada no ensino científico, visões mais ou menos deturpadas, mais ou menos críticas sobre a ciência serão formadas no intelecto do estudante. Presumo que dada a oportunidade, este estudante provavelmente disseminará os valores que aprendeu e assim o ciclo perpetuador se repete. Desta forma, é intuitivo supor que diferentes indivíduos possuirão diferentes concepções de ciência e que, portanto, a ciência não é tão *objetiva* quanto alguns gostariam<sup>45</sup>. Assim como vários outros temas mencionados neste capítulo, as relações entre pedagogia e

---

ao redor do mundo, especialmente na América Latina no final do século XIX, influenciando moderadamente, por exemplo, o movimento republicano brasileiro. Comte propunha abertamente uma ditadura republicana com a ideia de um *governo de salvação em nome do povo* Fausto (2002, p. 232).

<sup>44</sup>A psicologia é uma área do conhecimento que até o momento não pude me aprofundar. Não obstante a isso, considero que minha argumentação não se enfraquece por sua necessidade momentânea de aceitar que aspectos psicológicos afetam a concepção de conhecimento científico válido.

<sup>45</sup>Aqui uso o termo objetiva em oposição à subjetiva. Não tenho intenção de entrar nos méritos da discussão sobre objetividade do conhecimento científico, um conceito bastante controverso e ambíguo na epistemologia contemporânea (Godfrey-Smith, 2003).

ciência estão fora do escopo específico de minha tese. Contudo, este é um tópico que nitidamente merece maior aprofundamento.

Os três componentes que mencionei acima (histórico-social, psicológico e pedagógico) foram negligenciados, por muito tempo na literatura epistemológica<sup>46</sup>. Mesmo na literatura das últimas décadas (*e.g.* Chalmers, 1993; Gewandsznajder, 1989), o papel social na evolução do conhecimento científico é tratado com muita cautela, visto que muitos filósofos consideram o assunto muito contraditório. Para estes filósofos, reconhecer que aspectos sociais afetam a ciência implica em admitir que o conhecimento científico é subjetivo, o que, para eles, inviabiliza todo o projeto de ciência baseado na elaboração e refinamento de um método científico racional exclusivo. A conclusão que chego sobre este tema é, de certa maneira, conciliatória, pois considero plenamente plausível concebermos a ciência como uma atividade que, internamente, se preocupa em usar métodos que aproximam o cientista de uma verdade desconhecida, mas que, externamente, é moldada por um componente subjetivo e social que definem múltiplas culturas epistêmicas que não só coexistem, mas interagem no ambiente científico.

Em vista de tudo que foi discutido, finalizo minha argumentação retomando o problema básico que motivou este estudo. Porque não procurar reconhecer a multiplicidade de meios que existem para se obter um conhecimento cientificamente válido? Porque visar uma postura de priorização de métodos para se atingir um conhecimento válido, ou seja, porque buscar uma definição que preconiza, a priori, estabelecer qual é o melhor método, ou o único método válido? Porque encarar o debate de maneira conflituosa, em tom de disputa? Talvez, imprimir um tom de disputa em debates seja um mecanismo inerente, instintivo ou apenas um processo adotado há tanto tempo que se enraizou fortemente no comportamento humano. Talvez seja um reflexo da filosofia positivista de Comte ainda presente no pensar científico contemporâneo. Talvez seja reflexo de uma adesão ao método popperiano sem uma devida reflexão crítica prévia deste método. Seja qual for o motivo, não consegui encontrar nenhum argumento capaz de me convencer de que uma postura conflituosa deva ser adotada como princípio, afinal devemos supor que alguém que procura invalidar o conhecimento de outrem possui algum argumento muito convincente – se não garantido – que o favoreça, algo que raramente vemos na história da ciência. É nítido, a

---

<sup>46</sup>A relevância dos aspectos sociais como determinantes da definição de ciência passou a ser considerada, efetivamente, apenas depois da década de 1960 por filósofos como Thomas Kuhn, Imre Lakatos, Larry Laudan e Paul Feyerabend. Estes filósofos possuem visões distintas sobre como aspectos sociológicos afetam a ciência. Sugiro, novamente, a leitura de Chalmers (1993); Gewandsznajder (1989); Godfrey-Smith (2003) para uma breve introdução à filosofia dos autores supracitados.

meu ver, que muitos daqueles que adotam uma postura conflituosa num debate controverso têm como premissa a noção de que só melhoramos ou avançamos nosso conhecimento por meio de substituição, *i.e.*, trocando uma teoria por outra que a aprimora. Neste caso, é inconcebível que duas teorias sobre um mesmo assunto possam coexistir, portanto, a única resolução para controvérsias é um debate conflituoso em que os envolvidos já chegam preparados para descredenciar e invalidar as afirmações ou teorias de seus oponentes. Fazendo uma analogia com uma guerra, os debatedores chegam ao debate munidos de críticas depauperantes da perspectiva oposta e, o que é mais grave, envoltos em um escudo intransponível: a preconceção de que sua proposta é a melhor e isso não está em jogo; deve-se apenas demonstrar. O problema é que uma demonstração baseada apenas nas falhas do oponente não garante a validade ou a supremacia da visão do atacante (proponente), a qual, indubitavelmente, conterà falhas também.

Decidir categoricamente qual falha é mais ou menos comprometedora para a ciência é muito complicado, se não inviável na maioria dos casos, como procurei mostrar nesta longa reflexão. Dentre muitos exemplos que poderiam ser citados, explorei parcialmente esse problema com as controvérsias epistemológicas na ecologia, que chegaram a um ponto de radicalismo extremo com as perspectivas de Peters (1976) e Murray Jr. (2001). Então, é bastante plausível que nas diferentes disciplinas ou subdisciplinas científicas observemos cientistas usando métodos distintos, as vezes para responder uma mesma questão geral (*e.g.* Keller, 2003). Em minha perspectiva, as controvérsias geradas pelas falhas epistêmicas são uma grande oportunidade que os debatedores tem de ampliarem seu conhecimento, não somente reconhecendo as virtudes de suas próprias perspectivas epistêmicas e como elas resolvem as falhas de visões diferentes, mas principalmente procurando compreender como as falhas de suas perspectivas podem ser corrigidas pelas virtudes de outras epistemes em debate. Enfim, é uma grande oportunidade para acordos entre os debatedores (Almeida, 1999). Portanto, estou convencido – e espero ter convencido o leitor – de que adotar uma postura conflituosa por princípio é improdutivo e indesejável; não só por atrapancar o avanço do conhecimento científico, mas por restringir inapropriadamente a atividade de um cientista.

### **2.5.1 Proposições gerais**

Concluo este capítulo afirmando que não existe critério racional categórico para se determinar a validade científica de um conhecimento, portanto usar a epistemologia para justificar a crença de que a ecologia não é uma ciência, é prover uma justificativa infundada. Com suas bases enraizadas na teoria evolutiva de Darwin e Wallace, a ecologia foi desenvolvida de modo polimórfico, em diversos ramos mais

ou menos específicos e com suas respectivas idiossincrasias teóricas e metodológicas. Neste capítulo e no anterior, procurei mostrar que não temos meios para dizer que a ecologia não tem teorias e leis gerais, tampouco para descredenciar um programa de pesquisa ecológico usando critérios tão arbitrários como o grau de generalidade das teorias que fundamentam este dado programa de pesquisa. Desta forma, adotar uma postura conflituosa no debate epistemológico – e aqui não restrinjo-me apenas à ecologia, mas refiro-me a qualquer ramo científico – é uma postura claramente contra-intuitiva para um cientista do século XXI minimamente atento à filosofia. Recomendo, portanto, que uma concepção pluralista de ciência, em termos epistemológicos e metodológicos, seja adotada como a base fundamental do pensamento de um cientista. Isso não implica em aceitar que tudo é possível na ciência como propôs Feyerabend (1993), mas apenas que não existe um único método científico composto apenas por regras objetivas ou que visem objetividade. Este é apenas o componente interno (e não garantido) da atividade científica, mas que possui algumas propriedades gerais. Para entendermos o conceito de pluralismo, é necessário assumir que a ciência é composta por inúmeras culturas epistêmicas distintas e que muitas vezes os adeptos de uma dada cultura estão abertos para assumir acordos pragmáticos que os permitam aceitar a validade dos métodos científicos empregados por adeptos de outras culturas epistêmicas (Almeida, 1999; Keller, 2003). Sugiro que o cientista, especialmente o ecólogo, reconheça a possibilidade de acordos interativos em debates epistemológicos controversos. Por acordos interativos refiro-me à possibilidade de integrar epistemes e métodos praticados em diferentes áreas de conhecimento científico que possuam questões, problemas ou objetivos comuns. É nesse sentido que a proposta que defendo nesta tese é a do pluralismo interepistêmico (ou metodológico) para o avanço da ciência.

## **Bibliografia**

- Almeida, M. 1999. Guerras culturais e relativismo cultural. – *Revista Brasileira de Ciências Sociais* 14(41): 5–14.
- Arruda, J. J. A. 1991. *História moderna e contemporânea*. – Editora Ática.
- Chalmers, A. F. 1993. *O que é ciência afinal?*. – Editora Brasiliense.
- Cooper, G. 2003. *The Science of the Struggle for Existence: On the Foundations of Ecology*. – Cambridge Studies in Philosophy and Biology. Cambridge University Press.

- El-Hani, C. 2006. Generalizações ecológicas. – *Oecologia Braziliensis* 10(1): 17–68.
- Eves, H. 2004. Introdução à história da matemática. – Tradução de: *An introduction to the history of mathematics*, 1990, 1964. Editora da UNICAMP.
- Fausto, B. 2002. História do Brasil. – Didática 1. Editora da Universidade de São Paulo.
- Feyerabend, P. 1993. *Against method*. – Verso.
- Gewandsznajder, F. 1989. *O método científico*. – Livraria Pioneira Editora.
- Godfrey-Smith, P. 2003. *Theory and Reality: An Introduction to the Philosophy of Science*. – Science and Its Conceptual Foundations series. University of Chicago Press.
- Hempel, C. G. e Oppenheim, P. 1948. *Studies in the Logic of Explanation*. – *Philosophy of Science* 15(2): 135–175.
- Keller, E. 2003. *Making Sense of Life*. – Harvard University Press.
- Laudan, L. 1971. Towards a reassessment of Comte's "Methode Positive". – *Philosophy of Science* 38: 35–53.
- Laudan, L. 1981. *Science and Hypothesis: Historical Essays on Scientific Methodology*. – The Western Ontario Series in Philosophy of Science: A series of books in philosophy of science, methodology, epistemology, logic, history of science and related fields; v. 19. Springer-Science + Business Media, B.V.
- Lemos, N. 2007. *An Introduction to the theory of knowledge*. – Cambridge Introductions to Philosophy. Cambridge University Press.
- Murray, B. G. 2000. Universal laws and predictive theory in ecology and evolution. – *Oikos* 89(2): 403–408.
- Murray Jr., B. 2001. Are ecological and evolutionary theories scientific?. – *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 76(2): 255–289.
- Pearson, K. 1900. *The grammar of science*. – Adams and Charles Black.
- Peters, R. H. 1976. Tautology in evolution and ecology. – *The American Naturalist* 110(971): 1–12.
- Salmon, W. 1989. *Four Decades of Scientific Explanation*. – University of Pittsburgh Press.



- Salsburg, D. 2001. *The Lady Tasting Tea: How Statistics Revolutionized Science in the Twentieth Century*. – Henry Holt and Company.
- Turchin, P. 2001. Does population ecology have general laws?. – *Oikos* 94(1): 17–26.
- Turchin, P. 2003. *Complex Population Dynamics: A Theoretical/empirical Synthesis*. – Monographs in population biology. Princeton University Press.



## **Capítulo 3**

### **Pluralismo heurístico: relações entre modelagem e epistemologia**

Pluralismo metodológico é um conceito recente na filosofia das ciências e que, de certa forma, divide os filósofos (e os cientistas atentos à filosofia). Nem todos aqueles que se dedicam à árdua tarefa de dar sentido à ciência estão de acordo que é racional assumir a possibilidade de haver múltiplos meios para se atingir um conhecimento que possa ser classificado como científico. Muitas das controvérsias que venho debatendo podem ser contextualizadas dentro da discussão sobre a existência ou não de um método científico único e exclusivo. Em meu ponto de vista, como já deixei claro no capítulo anterior, a resposta é não. Existem fatores psicológicos, pedagógicos e sociais que influenciam previamente a concepção que qualquer indivíduo tem do mundo e que acabam se refletindo na formação de culturas epistemológicas distintas na ciência (Almeida, 1999; Keller, 2003). No entanto, devemos lembrar que este é um tema de enormes controvérsias e que, no capítulo anterior, foram abordadas num nível ideológico e amplo das teorias filosóficas. Neste capítulo, discorrerei sobre um tópico particular e um pouco mais concreto da atividade científica: a modelagem como ferramenta para construção do conhecimento. Minha intenção ao descrever os diferentes tipos e usos de modelos na ecologia é tanto evidenciar um pluralismo heurístico nesta disciplina quanto mostrar que existe uma relação entre os problemas da epistemologia e as abordagens que o cientista usa para modelar seus sistemas de estudo. Neste momento me ocuparei em fazer uma análise apenas descritiva do tema, deixando para desenvolver efetivamente meu argumento específico pelo pluralismo epistemológico no capítulo seguinte, em que uma síntese será apresentada.

Ao adentrarmos no campo da modelagem, devemos estar preparados para lidar novamente com questões epistemologicamente controversas. Modelos são ferramentas indispensáveis para a construção do conhecimento científico e se tornaram um componente inerente de qualquer episteme contemporânea (Cooper, 2003). No entanto, definir o que é um modelo é mais uma questão complexa para a qual não existe uma resposta certa, ou como costuma-se dizer no jargão científico, *uma bala de prata*. Quais são os propósitos de *modelar* e como esta atividade deve ser realizada em estudos ecológicos ainda são indagações intensamente debatidas entre cientistas e filósofos (*e.g.* Getz, 1998; Cooper, 2003; Taylor, 2005; Evans et al., 2013). Um aspecto da arte da modelagem que parece comum à qualquer tipologia é o papel instrumental-heurístico que esta atividade exerce na construção do conhecimento. Modelos auxiliam um cientista a resolver vários dos problemas que ele enfrenta em seu dia a dia – seja na tomada de decisões a partir da evidência contida nos dados, seja na concepção de teorias preditivas ou na conjectura de hipóteses testáveis empiricamente. Modelos são ferramentas que facilitam a formalização das ideias contidas em hipóteses e teorias, que a princípio são enunciados verbais. Esta formalização pode ser feita de múltiplas formas, haja visto a diversidade de questões científicas e de hipóteses que delas

sucedem. Desta forma, é no mínimo intuitivo pensar que existam (e surjam) diferentes abordagens ou técnicas de modelagem para formalizar diferentes tipos de hipótese que estejam em jogo em determinada investigação científica. Portanto, considero apropriada a sugestão de Godfrey-Smith (2003, p. 187), o qual afirma que modelos são “*veículos representacionais*” de algum conceito ou teoria científica e que seria um “*erro achar que toda a ciência usa os mesmos ‘veículos’ para representar o mundo*”. Em suma, podemos dizer que *modelagem* é o uso heurístico de redescrições com a função de descrever, explicar ou entender algum fenômeno natural de interesse (Taylor, 2005).

Embora a matemática não seja uma necessidade para construirmos teorias em modo verbal<sup>1</sup>, esta ciência passou a ser fortemente usada na construção de modelos ecológicos durante as últimas décadas. Com a valorização ao processo de quantificação das observações ocorrido após a revolução científica do século XV, foi inevitável que modelos matemáticos passassem a ser desenvolvidos em estudos científicos na física e posteriormente na biologia. Neste capítulo, discutirei o papel desempenhado por três diferentes abordagens de modelagem usadas nos diversos programas de pesquisa dos ecólogos. São as abordagens estatística, por equações diferenciais e por simulações computacionais. Em linhas muito gerais, a primeira é principalmente usada na descrição de padrões empíricos, a segunda na análise de sistemas dinâmicos teóricos, enquanto que a última abordagem pode ser usada com ambas as finalidades. Na primeira seção, abordarei como a estatística se modernizou após seu encontro com a biologia e como modelos estatísticos passaram a ser usados para analisar a evidência contida em dados empíricos, especialmente como meio de se testar hipóteses. Em seguida passarei a discutir alguns tópicos relacionados à modelagem e análise de sistemas dinâmicos, em particular na ecologia de populações. Nesta seção, aterei-me a contextualizar um embate específico entre modeladores que usam a abordagem matemática de equações diferenciais e aqueles que usam simulações computacionais para resolverem seus problemas. Por fim, concluirei a discussão sobre as abordagens de modelagem preparando o leitor para o capítulo seguinte, em que exporei minha proposta de programa de pesquisa científico.

---

<sup>1</sup>O exemplo mais comum que demonstra essa afirmação é a teoria de Darwin e Wallace. Mas podemos juntar diversos outros exemplos como a teoria de Connell que propõe a hipótese de distúrbio intermediário como processo regulador da riqueza de comunidades florestais ou de recifes de coral (Connell, 1978, fig. 1, p. 1303).

### 3.1 Probabilidade, variabilidade e amostragem: a estatística inferencial e sua influência nas ciências biológicas

Atualmente, é inegável a importância da estatística na construção do conhecimento científico em qualquer área das ciências biológicas, embora a história não tenha sido assim por muito tempo na ecologia. Como apresentei no capítulo 1, a *origem* da ecologia como disciplina científica foi fortemente influenciada pelo pensamento dos naturalistas do século XIX, os quais tinham um apreço muito grande pela descrição conceitual, factual e não matematizada de suas ideias e observações. A estatística só veio a se consolidar efetivamente na ecologia depois da década de 1970, quando percebemos um maior rigor no delineamento de estudos experimentais e observacionais e uma preocupação maior em justificar a evidência contida nos dados coletados. Contudo, um dos aspectos mais interessantes em meu ponto de vista, é que foi justamente no ramo das ciências biológicas que a estatística, um ramo da matemática<sup>2</sup>, encontrou um ambiente prolífico para avançar. Para entender mais claramente como a teoria (e a modelagem) estatística se disseminou entre os ecólogos, apresentarei a seguir como algumas concepções estatísticas fundamentais foram elaboradas, retomando alguns aspectos já discutidos no capítulo 1.

A noção de probabilidade, embora já conhecida por Aristóteles<sup>3</sup>, começou a ser formalmente desenvolvida apenas nos séculos XVII e XVIII<sup>4</sup> com matemáticos como de Moivre e os irmãos Bernoulli (Jacob e Nicolas), os quais estavam interessados em desenvolver teorias probabilísticas principalmente para compreender a distribuição de eventos em jogos de azar (*e.g.* lances de dados, cartas ou roleta; Zar, 2006; Salsburg, 2001). Nesta época, a distribuição normal ou gaussiana de probabilidades fora elaborada<sup>5</sup> e sua aplicação nos estudos de Laplace pode ser considerada a introdução de uma teoria

---

<sup>2</sup>Este sem dúvida é um assunto controverso entre os matemáticos, que algumas vezes costumam separar a estatística da matemática. Aqui, considero que a teoria de probabilidades e teoria estatística são teorias tipicamente matemáticas.

<sup>3</sup>Para Aristóteles, o conceito de probabilidade foi interpretado como “*uma sensação pessoal sobre o que deve ser esperado*” (Salsburg, 2001, p. ix).

<sup>4</sup>(Zar, 2006) comenta que o primeiro trabalho no assunto *probabilidade* foi publicado em 1657 por Cristiaan Huygens.

<sup>5</sup>Muitos creditam a de Moivre a primeira menção à distribuição normal, em 1733, embora alguns pesquisadores sugerem que Daniel Bernoulli já a usava antes disso (Zar, 2006; Salsburg, 2001). De Moivre no fim do século XVIII provou que o teorema do limite central se aplica a pequenas coleções de números obtidos de variáveis binomiais (*e.g.* o resultado do lance de uma moeda; Salsburg, 2001; Gotelli e Ellison, 2004). Desde então, a distribuição normal passou a ser convencionalmente usada para descrever dados empíricos de diversas naturezas (Salsburg, 2001).

probabilística nas ciências naturais.

Laplace, no entanto, é muito conhecido por ter consolidado as bases do determinismo causal, que pode ser resumido pela noção de que o estado atual do universo é causado pelo seu estado anterior e determina seu estado futuro. Assim, conhecendo-se as leis fundamentais da natureza e o estado atual do universo, um cientista poderia prever seu futuro e recobrar seu passado com alta precisão. O ponto de vista de Laplace é comumente sintetizado citando-se um célebre trecho de seus manuscritos, no qual este matemático sugere um experimento mental conhecido como *o demônio de Laplace*:

*We ought then to regard the present state of the universe as the effect of its anterior state and as the cause of the one which is to follow. Given for one instant an intelligence which could comprehend all the forces by which nature is animated and the respective situation of the beings who compose it—an intelligence sufficiently vast to submit these data to analysis—it would embrace in the same formula the movements of the greatest bodies of the universe and those of the lightest atom; for it, nothing would be uncertain and the future, as the past, would be present to its eyes. The human mind offers, in the perfection which it has been able to give to astronomy, a feeble idea of this intelligence. Its discoveries in mechanics and geometry, added to that of universal gravity, have enabled it to comprehend in the same analytical expressions the past and future states of the system of the world. Applying the same method to some other objects of its knowledge, it has succeeded in referring to general laws observed phenomena and in foreseeing those which given circumstances ought to produce.*

*Laplace (1902, p. 4)*

Curiosamente, este trecho foi publicado em seu ensaio sobre probabilidades, o que pode parecer um contrassenso dado o forte tom determinístico de sua filosofia. Para desfazer essa aparente contradição, é necessário levar em conta que Laplace usa distribuições probabilísticas como uma função de erro. Para ele, o fato de nossas observações não condizerem precisamente com as previsões teóricas decorre simplesmente de nossas limitações observacionais. Desta forma, pequenos erros seriam esperados, por exemplo, devido à imprecisão de nossos instrumentos de medida ou a efeitos de confusão não controlados experimentalmente e de baixa magnitude, causando pequenos desvios em relação às previsões (Salsburg, 2001). Assim, seria esperado que este erro diminuísse, conforme as leis da natureza fossem descobertas e com o desenvolvimento de melhores instrumentos de medida. Porém, o tempo mostrou que Laplace estava errado. Como bem colocado por Salsburg (2001, p.viii), no final do século XIX “*os erros tinham acumulado ao invés de diminuir. Conforme as medidas se tornavam mais e mais precisas, mais e mais erro brotava*”.

Pode-se dizer que a transição de um pensamento determinístico para um probabilístico veio a se consolidar efetivamente na virada do século XIX (embora nem todos os cientistas compartilhassem desta

mudança de pensamento). Na física, a teoria quântica destaca a incapacidade de predizermos deterministicamente alguns fenômenos que ocorrem em escala atômica e sub-atômica <sup>6</sup>. Contudo, foi na biologia que a teoria de probabilidades encontrou um campo novo e prolífico para se desenvolver. Como mencionei no capítulo 1, a teoria biométrica de Galton foi fundamental para que Pearson desenvolvesse sua teoria probabilística e estatística. Pearson introduziu um novo conceito sobre probabilidade, a qual deixava de ser um erro de medição para constituir uma propriedade inerente de qualquer conjunto de dados observados sobre alguma variável. A noção de que a variabilidade não é uma questão de erro, mas uma propriedade intrínseca de sistemas biológicos, não era uma novidade (Darwin e Wallace, 1858). Entretanto, Pearson aprimora o conceito ao torná-lo, de certa forma, quantitativo e preditivo, ou seja, ele transforma a noção de variabilidade em um problema de distribuição de frequências e, consequentemente, de probabilidades. Esta concepção ficou evidente para Pearson em seus estudos biométricos, nos quais ele foi capaz de estimar os parâmetros de sua *distribuição assimétrica*<sup>7</sup> para valores observados de diversos atributos morfológicos de algumas espécies, particularmente de humanos. Este ponto de vista demonstra a possibilidade de se adotar uma perspectiva probabilística em detrimento de uma visão determinística de mundo, o que representou a semente de outra concepção muito enraizada no pensamento ecológico atualmente – a de que a dinâmica de populações ou de comunidades são reguladas por processos estocásticos. Este, no entanto, é tema para a próxima seção.

A concepção probabilística de mundo atraiu a atenção de importantes matemáticos do começo do século XX, dentre eles Ronald A. Fisher<sup>8</sup>. Seria muito complicado sintetizar aqui a contribuição de

---

<sup>6</sup>O exemplo mais comum é o princípio da incerteza de Heisenberg, pelo qual somos incapazes de determinar a posição e a velocidade (momento) de um elétron. Desta forma, o simples ato de observar alteraria os processos da natureza e assim toda a cadeia de causa e efeito seria quebrada (Gotelli e Ellison, 2004, p. 10).

<sup>7</sup>Além de sua generalização para o precedimento de regressão proposto por Galton com o coeficiente de correlação, Pearson derivou uma função de distribuição probabilística, a *distribuição assimétrica* (*skew distribution*; Salsburg, 2001), a qual se tratou de uma generalização da distribuição normal de probabilidades. Enquanto a distribuição normal é um modelo definido por dois parâmetros, média e desvio padrão, a distribuição assimétrica de Pearson possui quatro parâmetros, que segundo Pearson seriam suficientes para descrever qualquer conjunto de dados que um pesquisador tenha em mãos. Além da média e desvio padrão, os outros dois parâmetros são assimetria (uma medida do grau com que os dados se agrupam de um dos lados da média) e curtose (uma medida de quão distante os eventos raros estão da média). Assim, a distribuição normal passa a ser um caso especial desta distribuição assimétrica, em que os parâmetros assimetria e curtose são iguais a zero.

<sup>8</sup>Vale notar que William S. Gosset foi outro importante matemático que proveu contribuições fundamentais à estatística neste período de transição do século XIX, que inclusive influenciaram bastante tanto Pearson quanto Fisher. Devido a restrições contratuais com a empresa em que trabalhava (no caso, a cervejaria Guinness) que o impediam de publicar seus achados, Gosset teve de usar o pseudônimo “Student” em suas publicações. Destaco duas de suas contribuições mais importantes. Primeiro, ele demonstrou um uso aplicado para a distribuição de Poisson, descoberta 100 anos antes de Gosset, porém desprovida de exemplos da vida real que a tornasse útil. Contudo, foi com o seu teste estatístico chamado *t* de Student, que o problema de inferências estatísticas baseadas



Fisher para a ciência, dada a vasta amplitude de sua obra. A variedade de questões com as quais Fisher se envolveu torna difícil uma integração lúcida de sua obra na biologia e na estatística, um tema que sem dúvida carece de maior aprofundamento na literatura em filosofia das ciências. Esta dificuldade em se demonstrar a interdisciplinaridade no programa de pesquisa de Fisher não impede de reconhecermos que ele foi, no mínimo, um cientista multidisciplinar, interessado em diversos tipos de questão e, principalmente, que ele adotou uma filosofia epistemologicamente pluralista no conjunto de sua obra. Devo esclarecer que não estou afirmando que o programa de pesquisa fisheriano é ideal ou que represente o método que o cientista deva seguir. O pluralismo metodológico com o qual ele conduziu seu eclético programa de pesquisa resultou em avanços científicos indisputáveis<sup>9</sup>, mas também em debates calorosos devido a críticas e falhas existentes em sua obra. Ao descrever o pensamento de Fisher, quero apenas dar mais um exemplo de que a atividade científica está aberta ao pluralismo epistemológico e mostrar que esta abertura parece ser tão maior quanto mais amplo for o programa de pesquisa de um cientista, *i.e.* quanto mais variadas forem as questões que este cientista se propõe a responder. Discorrerei a seguir sobre três pontos específicos deste complexo pluralismo epistêmico fisheriano, destacando suas relações com as diferentes heurísticas – em termos das abordagens de modelagem – usadas por este matemático na resolução de seus problemas.

O primeiro ponto se refere à lógica indutiva desenvolvida por Fisher, uma filosofia não muito fácil de se compreender, porém na qual ele propõe o conceito de verossimilhança (Fisher, 1935, 1955). Lembremos que nesta mesma época, os lógico-empiricistas, como Hempel e Carnap, se preocupavam em formalizar regras de linguagem que descrevessem os meios usados pelos cientistas para explicar os padrões que observavam. Uma das preocupações destes filósofos foi descrever uma linguagem que justificasse uma lógica indutiva na ciência (*e.g.* explicações indutivo-estatísticas (I-S); Salmon, 1989), embora seja consenso entre os filósofos atuais que esta tentativa dos lógico-empiricistas não vingou. Fisher, no entanto, justificou sua lógica indutiva por meio da matemática e, para isso, o conceito de verossimilhança ( $\mathcal{L}$ ) foi fundamental. Segundo este matemático (Fisher, 1935, p. 40),

*... a mathematical quantity ... , which I have termed mathematical likelihood, appears to take its place as a measure of rational belief when we are reasoning from the sample to the population. Mathematical likelihood makes its appearance in the particular kind of logical*

---

em evidências provenientes de amostras pequenas – uma questão ignorada até aquele momento por Pearson – passou a ser devidamente tratado na ciência (Salsburg, 2001).

<sup>9</sup>Espero que até o final desta tese fique evidente a relevância da contribuição de Fisher para a biologia em geral e para a ecologia em específico.

*situation which I have termed a problem of estimation.*

Fisher deixa claro que o uso de sua lógica indutiva – e do conceito de verossimilhança por consequência – se justifica em problemas cujo interesse principal é estimar os parâmetros reais de distribuições probabilísticas que definem um certo conjunto de dados observados; um problema típico nos estudos biométricos de Pearson. A verossimilhança é uma medida do ajuste de uma distribuição probabilística hipotética (e com os valores de seus parâmetros definidos) a um conjunto de dados que para Fisher (1935, p. 39) nos permite “*dar sentido à figuras*” (*i.e.* ajustar as melhores curvas que descrevam nossos dados).

Em linhas gerais, o que está em jogo na lógica indutiva de Fisher é uma justificativa teórico-matemática para o raciocínio indutivista ingênuo. Fisher proveu uma técnica que, segundo ele, é o meio mais correto fazer inferências gerais (*i.e.* inferir os valores dos parâmetros da distribuição probabilística que define a variável de interesse) a partir de observações particulares (*i.e.* uma amostra finita e aleatória da população total de dados). De forma simplificada, esta técnica para estimar os melhores parâmetros de uma distribuição probabilística com base em dados empíricos consiste em: i) assumir uma forma geral para a distribuição probabilística que descreve nossa variável de interesse (*e.g.* normal, binomial, exponencial, etc.), ii) descrever na forma de um modelo matemático geral as infinitas hipóteses sobre valores de parâmetros que a distribuição probabilística pode assumir, iii) calcular a verossimilhança de cada hipótese (modelo do conjunto infinito) e iv) determinar qual hipótese possui a maior verossimilhança associada. A princípio, esta heurística pode parecer impossível já que nunca daremos conta de calcular a verossimilhança de infinitas hipóteses. Entretanto, Fisher argumenta que para diversas formas de distribuição probabilística, existe uma solução analítica para o problema de se estimar quais são os valores de parâmetros, portanto qual a hipótese que possui a máxima verossimilhança (Fisher, 1922, 1955).

Para deixar a lógica indutiva de Fisher mais clara para o leitor, valerei-me do seguinte exemplo: suponha que um cientista queira estimar qual é a média do tamanho da asa ( $T_A$ ) de uma determinada espécie de ave e que ele dispõe de uma coleção de 100 medidas destes tamanhos referentes a 100 asas de indivíduos diferentes da espécie em estudo. A distribuição normal ( $\mathcal{N}$ ) é tradicionalmente usada para descrever variáveis que assumem valores contínuos, como tamanho e massa. Vamos, então, assumir que a forma geral da distribuição probabilística que descreve os dados deste pesquisador (e, portanto, a população subjacente a esses dados) seja a distribuição normal. Esta distribuição possui dois parâmetros que a definem, a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) e é expressa pela seguinte função de densidade de

probabilidade (*fdp*):

$$\mathcal{N}(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (3.1)$$

em que  $x$  representa a variável de interesse, neste caso o tamanho da asa da espécie em questão. Consideremos, por uma simples questão de simplificação didática, que sabemos de antemão o valor do desvio padrão desta distribuição ( $\sigma = 2$ ) e que estamos interessados apenas em estimar qual é o valor de  $\mu$  que provê o valor de máxima verossimilhança ( $\mathcal{L}_{max}$ ).

Sendo assim, podemos representar nossa variável aleatória de interesse como  $T_A \sim \mathcal{N}(x; \mu, \sigma = 2)$  e nosso conjunto de dados como  $T'_A = \{x_1, x_2, \dots, x_{100}\}$ . Sabendo que a função geral que define a verossimilhança de um modelo é

$$\mathcal{L}(\theta | X) = \prod P(x_i | \theta) \quad (3.2)$$

em que  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}$  é o conjunto de dados disponíveis e  $\theta$  é um parâmetro que define a função de densidade de probabilidade,  $P$ . Trazendo para o contexto do exemplo que venho apresentando, podemos dizer que

$$\mathcal{L}(\mu = m, \sigma = 2 | T'_A) = \prod \mathcal{N}(T'_{A_i} = x_i | \mu = m, \sigma = 2) \quad (3.3)$$

Desta forma, podemos calcular a verossimilhança para qualquer hipótese referente ao valor de  $\mu$  (*i.e.* para qualquer  $\mu = m$ ), usando para isso a eq. 3.3 e  $T'_A$ . Para esse caso específico, há uma solução analítica simples para o problema de determinar  $\mathcal{L}_{max}$ , a qual é dada para

$$\mu = m = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.4)$$

em que  $n$  é o tamanho de nossa amostra (*i.e.*  $n = 100$  no exemplo estudado). Portanto, quando a amostra da nossa variável de interesse provém de uma distribuição normal, a solução de máxima verossimilhança, portanto a melhor estimativa para média desta distribuição é dada pela média dos valores em nosso conjunto de dados (Fisher, 1922). Se, por exemplo, a média de  $T'_A$  é 10,93 cm, a melhor estimativa para o parâmetro  $\mu$  da distribuição de tamanhos de asa da espécie estudada será  $\mu = 10,93$  cm pois é com esta média que obtemos o valor de  $\mathcal{L}_{max}$  na eq. 3.3.

Descrita a heurística de sua abordagem de verossimilhança para estimar parâmetros de distribuições estatísticas, concentrarei-me agora em discutir mais detalhadamente os aspectos epistemológicos da episteme de fisheriana. A descrição acima deixa claro que Fisher foi um entusiasta e proliferador da

lógica indutiva na ciência, algo que ele enfatizou em ensaios publicados no final de sua carreira. Para Fisher, o aspecto criativo e inovador do pensamento científico se encontra no uso adequado do raciocínio indutivo. Este matemático diz:

*Statistical data are always erroneous, in greater or less degree. The study of inductive reasoning is the study of the embryology of knowledge, of the processes by means of which truth is extracted from its native ore in which it is fused with much error.*

(Fisher, 1935, p. 54)

Embora tenha provido uma teoria matemática contundente a favor de sua lógica indutiva, Fisher comete, em minha opinião, um equívoco ao considerar que a origem do conhecimento científico provém da observação, descartando a possibilidade criativa do componente conjectural do processo (um tema já discutido no capítulo anterior). Fisher parece ter mantido esse raciocínio ao dizer, 20 anos depois do comentário acima, que

*Deductive reasoning in particular supplies no essentially new knowledge, but merely reveals or unfolds the implications of the axiomatic basis adopted. Ideally, perhaps, it should be carried out mechanically. It is the function of inductive reasoning to be used, in conjunction with observational data, to add new elements to our theoretical knowledge.*

(Fisher, 1955, p. 74)

Independente do que venha primeiro no processo de construção do conhecimento científico, há de se ressaltar que a teoria de verossimilhança de Fisher, embora tenha sido negligenciada por décadas dos holofotes da ciência, não foi abandonada. Nas últimas décadas houve um resgate do conceito de verossimilhança e o posterior desenvolvimento de novas técnicas de inferência indutiva baseada neste conceito (e.g. Edwards, 1972; Hilborn e Mangel, 1997; Taper e Lele, 2004; Bolker, 2008). Entretanto, a lógica indutiva de Fisher não foi o componente de sua episteme que mais influenciou os biólogos do século XX. Podemos identificar no mínimo três grandes linhas ou escolas de pensamento estatístico que influenciam o ecólogo atualmente – ao menos aqueles que dedicam uma parte de seu tempo (*i.e.* de seu programa de pesquisa) ao componente empírico do processo científico. São as escolas *frequentista*, *verossimilhançista* e *bayesiana* de pensamento, as quais possuem métodos bem distintos de inferência, embora guardem algumas similaridades entre si (Taper e Lele, 2004). Meu enfoque agora passará à primeira destas escolas, a *frequentista*, para a qual a contribuição de Fisher foi incomensurável<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup>Não faz parte desta tese descrever e discutir os problemas epistemológicos destas escolas de pensamento estatístico. Uma breve noção da escola verossimilhançista fora dada com a apresentação da lógica indutiva de Fisher. A escola bayesiana não será abordada nesta tese, muito em decorrência do meu parco contato com esta episteme. Para um maior aprofundamento nos debates e controvérsias relacionadas a essas três escolas, sugiro como leitura introdutória Taper e Lele (2004).

O tema acima levantado me conduz ao segundo dos três pontos da episteme fisheriana que me propus a discutir; trata-se do *teste de significância*. Para Fisher um cientista enfrenta diferentes problemas além de estimar os valores mais plausíveis para os parâmetros da distribuição probabilística que define um certo conjunto de observações sobre uma determinada variável. Muitos são os casos em que o cientista tem o interesse de testar suas hipóteses sobre um determinado padrão ou processo da natureza, usando algumas propriedades estatísticas de seus dados como justificativa para suas inferências. É neste contexto que Fisher desenvolve o conceito de teste de significância como meio de justificar suas inferências a respeito de hipóteses estatísticas nulas. Este conceito possui pelo menos dois aspectos que o pesquisador deve estar atento para evitar confusões interpretativas. O primeiro é que o pesquisador deve considerar que seu conjunto de dados representa apenas uma das inúmeras seleções aleatórias que poderiam ser amostradas de uma distribuição hipotética que define a população da qual estes dados provêm. Isso nos leva ao segundo aspecto: esta distribuição hipotética é considerada como uma hipótese nula, *i.e.* uma hipótese aceita como premissa e sobre a qual os dados serão confrontados. Desta forma, Fisher enfatizou não apenas a importância de levarmos em conta o processo de amostragem em nossas inferências, tal qual já havia sido levantado anos antes por Gosset, com seu teste  $t$  (vide nota de rodapé 8), como também passou a conceber a distribuição probabilística que define uma população como uma hipótese sobre a qual é impossível afirmarmos algo sobre sua veracidade, mas apenas aceitá-la momentaneamente e colocá-la a teste.

Esta concepção muda completamente o raciocínio envolvido em uma inferência. Não é apenas a variabilidade intrínseca dos dados, mas também a parcialidade do processo observacional (*i.e.* só observamos uma amostra do conjunto total de dados observáveis uma amostra para uma dada variável) que geram incertezas e *erros* com os quais devemos lidar no processo inferencial. Basicamente, para testar uma hipótese nula o cientista deve determinar a chance de seu conjunto de dados ser proveniente da distribuição nula hipotetizada e assumida como verdadeira (*i.e.* dada a distribuição hipotetizada, qual é a chance de selecionarmos, ao acaso, um conjunto de dados com as mesmas características daquele efetivamente observado?). Para isso, Fisher enfatiza o procedimento pelo qual uma distribuição probabilística amostral pode ser derivada da distribuição populacional, levando-se em conta o tamanho amostral (*i.e.* graus de liberdade).

Este procedimento fica mais claro com um exemplo concreto. Retomemos o caso mencionado acima em que um pesquisador dispõe de um conjunto de dados com 100 observações de tamanhos de asas de

uma espécie de ave, cuja média é  $m_A = 10,93$ . Suponhamos que estas observações foram todas feitas em uma localidade A e que este cientista encontrou um estudo que afirma que, em uma localidade B, a média do tamanho da asa da espécie em questão é  $m_B = 10,13$ . Em posse dessas informações, o pesquisador pode se perguntar se a média do tamanho da asa da espécie na localidade A é a mesma que na da localidade B. Para responder esta questão simples, Fisher certamente responderia que poderíamos usar o teste  $t$  de Student para testarmos a hipótese nula de que  $\mu = 10,13$ . Este teste consiste em se calcular um valor estatístico, no caso o valor de  $t$ , que é dado por:

$$t = \frac{m - \mu}{s_m} \quad (3.5)$$

$$s_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

em que  $m$  é a média do tamanho da asa medida pelo pesquisador,  $\mu$  é a média tal qual definida pela hipótese nula (*i.e.* a média do tamanho de asa proveniente do estudo realizado na localidade B,  $\mu_B = 10,13$ ) e  $s_m$  é o erro padrão de  $m_A$ , obtido por uma relação entre a estimativa do desvio padrão  $\sigma = \sigma_A = 2$  e o tamanho da amostra,  $n = 100$ . O valor de  $t$  é considerado uma estatística no sentido que este valor está associado a uma probabilidade proveniente da distribuição de valores de  $t$  que poderiam ser obtidos sorteando-se amostras de tamanho  $n$  da distribuição populacional hipotética [no caso aqui exemplificado,  $\mathcal{N}(x; \mu = 10,13, \sigma = 2)$ ]. Fisher foi capaz de prover uma solução geral (*i.e.* uma função) para a distribuição probabilística de  $t$  (Salsburg, 2001). Desta distribuição, podemos calcular qual é a probabilidade ( $p$ ) de obtermos um valor maior ou igual ao  $t$  observado (calculado) e assim estimar qual é a probabilidade de que nosso conjunto de dados provenha de uma distribuição normal tal qual descrita pela hipótese nula (livros-textos introdutórios no assunto, como Zar, 2006; Underwood, 1997, descrevem muito bem esta e outras análises básicas em estatística).

Em um teste de hipótese nula, a probabilidade obtida pelo procedimento descrito acima possui uma definição muito clara, a qual Fisher enfatizou bastante em seus trabalhos. Ela simplesmente informa a probabilidade de nossos dados serem provenientes de uma distribuição probabilística hipotética. Se considerarmos *a priori* um critério de inferência baseado em uma referência arbitrária, que Fisher denominou de *nível de significância* ( $\alpha$ ), podemos concluir se a hipótese nula deve ser rejeitada ou não. Este é o teste de significância fisheriano. Alguns detalhes interpretativos devem ser ressaltados para que as inferências decorrentes do teste não sejam inconsistentes ou inadequadas. O nível de significância é

um valor crítico arbitrariamente estabelecido (por convenção,  $\alpha = 0.05 = 5\%$  em estudos ecológicos), tal que se  $p < \alpha$  o pesquisador conclui que a hipótese nula deve ser rejeitada. Se usarmos a Eq. 3.5 no exemplo acima, obtemos o valor de  $t = 4,0$ , implicando em  $p < 0.05$  portanto, na rejeição da hipótese nula de que  $\mu_A = 10, 13$ . No entanto, “Fisher nunca foi explícito sobre como o cientista deveria interpretar o valor de  $p$ ” (Salsburg, 2001, p. 100), tampouco foi ele quem convencionou que  $\alpha = 5\%$ . Fisher nunca foi assertivo quanto ao valor de  $p$  a ser usado como  $\alpha$ . Interpretar um teste de significância como uma evidência absoluta a respeito de uma hipótese é um dos maiores enganos que um pesquisador pode cometer, porém uma postura adotada por muitos pesquisadores (Salsburg, 2001). Devemos sempre ter claro – e Fisher sabia muito bem disso – que estamos lidando com probabilidades, portanto nossas inferências sobre alguma hipótese que passa por um teste estatístico nunca serão certezas, apenas possibilidades mais ou menos prováveis.

A proposta de Fisher com o teste de hipótese pode ser interpretada como uma tentativa de aliar a episteme dedutiva ao raciocínio hipotético-dedutivo como meio de se fazer inferências com base em observações empíricas. O dedutivismo se observa em suas derivações de funções analíticas que descrevem as distribuições probabilísticas e fica evidente com a afirmação abaixo:

*The inferences of the classical theory of probability are all deductive in character. They are statements about the behaviour of individuals, or samples, or sequences of samples, drawn from populations which are fully known.*

*(Fisher, 1935, p. 40)*

Já o hipotético-dedutivismo fica nítido com a concepção hipotética de mundo, com a própria tentativa de se estabelecer um teste para as hipóteses e em como este teste deve ser interpretado. Como comentado acima, a rejeição da hipótese nula não pode ser afirmada categoricamente. Porém, o aspecto mais controverso da filosofia hipotético-dedutiva de Fisher se refere ao que devemos fazer quando não é possível rejeitar a hipótese nula, *i.e.*  $p > \alpha$ . Fisher, fora assertivo ao dizer que nunca podemos aceitar a hipótese nula. Este tipo de afirmação ou conclusão é incabível dentro de um raciocínio hipotético-dedutivo, mostrando que Fisher estava atento aos fundamentos epistemológicos da lógica dedutiva e o problema da falácia de afirmar o consequente. Fisher (1955, p. 73–4) afirma que:

*... it is a fallacy, so well known as to be a standard example, to conclude from a test of significance that the null hypothesis is thereby established; at most it may be said to be confirmed or strengthened. In an acceptance procedure, on the other hand, acceptance is irreversible, whether the evidence for it was strong or weak. It is the result of applying mechanically rules laid down in advance; no thought is given to the particular case, and the tester's state of mind, or his capacity for learning, is inoperative. By contrast, the*

*conclusions drawn by a scientific worker from a test of significance are provisional, and involve an intelligent attempt to understand the experimental situation.*

Neste momento, o leitor deve ter notado uma forte semelhança entre a episteme de Fisher e a filosofia científica de Popper. A relação entre as obras destes dois autores deve ser vista com muito cuidado, pois este é um ponto que, a meu ver, gera muita confusão entre os cientistas, ao menos para os ecólogos. Ambos não admitem a possibilidade do investigador fazer qualquer afirmação contundente sobre a veracidade da hipótese em teste, *i.e.* a ênfase deve ser dada à rejeição (ou falsificação, como Popper propõe) da hipótese em questão. Em relação aos casos em que o pesquisador não tem meios seguros para rejeitar a hipótese em teste, ambos propõem o mesmo raciocínio geral de inferência, no entanto, usando terminologias diferentes. Fisher admite o uso do termo *confirmada* para nos referirmos sobre o *status* de uma hipótese não rejeitada, algo que Popper abominou completamente propondo o termo *corroborada* em substituição. Trata-se, portanto, de um problema semântico, ou seja, de dar o mesmo significado a termos diferentes. O que deve ficar claro aqui é que dificilmente encontraremos termos inequívocos, isto é, ausentes de interpretações semânticas distintas; este é um aspecto intrínseco da linguagem que se estende para o âmbito científico. Se não nos prendermos à rigidez dos termos e se formos maleáveis a alguns ajustes semântico-terminológicos, as propostas hipotético-dedutivas de ambos os autores é quase idêntica em linhas gerais.

Toda essa relação entre os pensamentos de Fisher e Popper, entretanto, deve ser vista como uma interpretação posterior levantada recentemente na filosofia. É necessário ter claro que ambos os pesquisadores tiveram motivações bem distintas para chegarem em suas propostas e que, provavelmente, estiveram alheios aos manuscritos que um ou outro publicou na época. Como mostrei até aqui, Fisher foi um matemático inglês diretamente envolvido com questões teórico-empíricas na biologia e estatística<sup>11</sup>, portanto em um círculo acadêmico intelectual bem distinto de Popper. Este filósofo austríaco, por sua vez, se envolveu diretamente com questões puramente epistemológicas relacionadas à atividade científica, tendo a física como referência de ciência (Gewandsznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). Tradicionalmente, os físicos não se valeram de métodos estatísticos em seus estudos e boa parte destes cientistas ainda adota uma postura confirmatória em suas inferências sobre o mundo<sup>12</sup> (Godfrey-Smith, 2003). Em minha pesquisa, não fui capaz de encontrar uma evidência contundente que ligue os pensamentos

---

<sup>11</sup>Fisher também se envolveu com a física astronômica, campo científico em que iniciou sua carreira (Salsburg, 2001)

<sup>12</sup>No capítulo anterior, entrei levemente neste assunto ao expor a discussão envolvida na proposta dedutivo-nomológica e em aceitar que teorias e hipóteses são confirmadas.



fundamentais de Popper sobre o método científico ao debate dos estatísticos (e vice-versa). Portanto, Popper e Fisher desenvolveram independentemente suas filosofias e não devemos usar argumentos de um autor para justificar o pensamento do outro, algo que muitas vezes ocorre implicitamente entre os cientistas<sup>13</sup>. Devemos ainda lembrar que se sairmos do contexto específico do *teste de hipóteses* e analisarmos amplamente as propostas filosóficas destes dois investigadores, fica fácil enxergar diferenças fundamentais entre elas. A mais notória é que Popper é cético ao indutivismo, algo que Fisher discordou completamente ao enfatizar o papel do raciocínio indutivo na construção científica, como mostrado nesta seção.

Antes que eu possa arrematar meu ponto de vista sobre a relação epistemológica entre a estatística e a filosofia popperiana, um assunto controverso e confuso na literatura, considero que há um último aspecto do contexto histórico no qual Fisher fez suas afirmações que merece ser esclarecido. A proposta Fisher não satisfaz alguns filósofos e matemáticos de sua época, como Jerzy Neyman e o filho de Karl Pearson, Egon, os quais também passaram a se dedicar a uma compreensão e definição clara do que é feito num teste estatístico e o que podemos concluir de um teste de hipóteses<sup>14</sup>. Resumidamente, Neyman e Egon Pearson consideravam que um teste de hipótese não faz sentido se apenas uma hipótese estiver em jogo (Salsburg, 2001). Em um teste de hipótese, o cientista deve ser capaz de elencar, previamente, hipóteses alternativas à nula como meio de suprir um vazio deixado pela rejeição da nula, caso este venha a ser o resultado do teste estatístico. Embora a proposta destes matemáticos estivesse aberta a múltiplas hipóteses alternativas, os cientistas que adotam a perspectiva de Neyman-Pearson frequentemente assumem uma única hipótese alternativa, a qual é descrita como uma simples oposição à hipótese nula (*i.e.* se a hipótese nula diz que  $\mu_A = m$ , a hipótese alternativa diz que  $\mu_A \neq m$ ; Salsburg, 2001). Visto desta forma, o ponto principal da filosofia de Neyman-Pearson fica mais fácil de ser apresentada. Eles concluíram que todo teste estatístico de hipóteses deve ser provido de uma medida que descreva o seu *poder*. Para entender este conceito, Neyman e Pearson se valem das noções erro do tipo I e erro do tipo II, as quais se disseminaram amplamente entre os cientistas, especialmente entre os biólogos. O primeiro tipo de erro decorre de rejeitarmos a hipótese nula quando ela é na verdade falsa e o segundo decorre de aceitarmos a hipótese nula quando ela é verdadeira. Neste sentido, o nível de significância de Fisher é equivalente à

---

<sup>13</sup>A filosofia de Simberloff e Peters, de certo modo, carrega consigo esse problema. Este assunto é bastante complexo e será retomado novamente mais adiante

<sup>14</sup>A proposta destes dois matemáticos é abordada em diversos livros introdutórios de estatística e restringirei-me a apresentar apenas os pontos principais para minha argumentação.

probabilidade de erro do tipo I, também expressa pelo símbolo  $\alpha$ , que o pesquisador aceita previamente em sua análise. Contudo, a probabilidade de erro do tipo II,  $\beta$ , é desconhecida do cientista por depender das características do delineamento experimental e das propriedades estatísticas da amostra (e.g. da média e do desvio padrão). Neyman e Pearson propõem, então, que o *poder* do teste é simplesmente  $1 - \beta$ , e informa sobre a probabilidade de aceitarmos a hipótese alternativa quando ela é realmente verdadeira.

A proposta filosófica de Neyman e Pearson entrou em conflito com a proposta de Fisher, gerando um longo debate entre estes matemáticos na literatura estatística. Foi neste debate que os excertos acima citados de Fisher foram apresentados ao público. Sintetizando o parágrafo anterior, para Fisher não existia a possibilidade de se aceitar a hipótese nula se o teste *falhasse*, enquanto Neyman e Pearson procuraram dar um argumento lógico para o aceite de hipóteses, com a ressalva de que os cientistas reconheçam os tipos de erro envolvidos no teste. Devo dizer aqui que a lógica de Neyman e Pearson não é tão intuitiva e claramente justificável quanto se costuma apresentar nos livro-texto introdutórios de estatística (ao menos para ecólogos; Underwood, 1997; Gotelli e Ellison, 2004) ou mesmo em revisões historiográficas nesta área. Nestes livros costuma-se enfatizar a noção dos tipos de erro como uma *necessidade* para que possamos fazer inferências apropriadas em nossos testes de hipóteses, o que demonstra um claro alinhamento à proposta de Neyman e Pearson. Alguns autores, como Salsburg (2001), ainda ressaltam abertamente que este debate foi *ganho* por Neyman e Pearson, uma afirmação que a meu ver é bastante problemática, principalmente para um estudante de biologia, que geralmente não está atento aos pormenores da discussão epistemológica. Primeiro, Neyman e Pearson não foram capazes de apresentar um argumento convincente e satisfatório que descredenciasse a proposta de Fisher. Em meu ponto de vista, Fisher (1955, p. 73) deu uma resposta simples, elegante e muito sensata aos seus rivais ao dizer que:

*It was only when the relation between a test of significance and its corresponding null hypothesis was confused with an acceptance procedure that it seemed suitable to distinguish errors in which the hypothesis is rejected wrongly, from errors in which it is "accepted wrongly" as the phrase does. The frequency of the first class, . . . , is calculable, and therefore controllable simply from the specification of the null hypothesis. The frequency of the second-kind must depend not only on the frequency with which rival hypotheses are in fact true, but also greatly on how closely they resemble the null hypothesis. Such errors are therefore incalculable both in frequency and in magnitude merely from the specification of the null hypothesis, and would never have come into consideration in the theory only of tests of significance, had the logic of such tests not been confused with that of acceptance procedures.*

Segundo, o procedimento estatístico de teste de hipótese de Neyman-Pearson é frequentemente associado

à noção de teste de hipótese popperiano<sup>15</sup> (e.g. Underwood, 1997; Gotelli e Ellison, 2004), o que a meu ver é pouco instrutivo, se não, errado. Como mostrei alguns parágrafos acima, não houve interação entre a discussão epistemológica na estatística e a filosófica de Popper no momento em que ambas foram propostas. Isso pode gerar uma grande confusão na mente de um aluno alheio à história. Ademais, se alguma associação posterior entre a filosofia estatística e o método de Popper pode ser feita, esta relação ocorre nitidamente com o pensamento de Fisher, como discutido em parágrafo anterior.

Para finalizar minhas considerações sobre o debate acima, devo notar que os pontos levantados guardam uma relação com a controvérsia epistemológica associada às proposições científicas de Simberloff e Peters, as quais reaparecem frequentemente em meu discurso. Sem a intenção de ignorar um aprofundamento na proposta de Peters, creio que agora seja um bom momento para apresentar alguns detalhes da proposta epistêmica de Simberloff, em particular. Este ecólogo alegou (e talvez ainda alegue) adotar o método hipotético-dedutivo de Popper em seu programa de pesquisa (Simberloff, 1983, 2004). No entanto sua interpretação da episteme popperiana é fundamentada quase que exclusivamente em argumentos estatísticos. Resumindo de modo simplificado o ponto de vista de Simberloff, ele argumenta que para podermos afirmar algo a respeito de mecanismos ou processos causadores de padrões na natureza, devemos antes de mais nada constatar se os padrões observados empiricamente não poderiam ser obtidos ao acaso, *i.e.* na ausência dos mecanismos de interesse do investigador. Basicamente, sua interpretação da episteme popperiana pode ser resumida no delineamento de procedimentos de observação empírica que permitam o teste de hipóteses nulas. Nota-se, portanto, a forte influência de Fisher no pensamento deste ecólogo. Esta perspectiva influenciou muitas gerações de ecólogos que se formaram a partir da década de 1980 (Gotelli e Graves, 1996) e que passaram a enfatizar o componente empírico-inferencial no processo de construção do conhecimento ecológico.

Este modo de produção científica enfatizado por Simberloff, embora bastante disseminado, possui limitações importantes que geram inúmeras questões em debate atualmente, como por exemplo: em um sistema dinâmico, que por definição depende de pelo menos um processo que o *movimente*, o que representa um modelo nulo? Em outras palavras, é possível modelarmos sistemas dinâmicos *nulos*? Até onde um ecólogo pode chegar usando a proposta de Simberloff? Qual é o ganho efetivo de conhecimento em termos preditivos quantitativos? Essas são questões que ainda permanecem em discussão e não está

---

<sup>15</sup>Esta associação muitas vezes não é explícita nestes livros, porém o discurso é estruturado de forma a permitir que o leitor chegue, facilmente, à conclusão que esta relação entre Popper e Neyman-Pearson poderia existir.

no escopo da tese respondê-las (veja Gotelli e Graves, 1996, para uma introdução aos modelos nulos).

Finalmente, apresento o terceiro e último ponto que quero destacar da episteme fisheriana. Este ponto decorre da aproximação de Fisher com a biologia, disciplina em que promoveu avanços muito significativos, notoriamente no campo da teoria evolutiva e genética (*e.g.* Fisher, 1930). Devo ressaltar aqui, que este terceiro ponto fora levantado tanto para realçar a abrangência do programa de pesquisa de Fisher, como para fazer um elo com a próxima seção. Fisher não se deteve a resolver questões estáticas, relacionadas à análise de dados empíricos e detecção e interpretação estatística de padrões observados. Este matemático também se dedicou ao componente conjectural da biologia, dedicando-se à modelagem de sistemas dinâmicos em genética de populações, tema no qual Fisher buscou entender como a seleção natural *atuaria* determinando distribuições de frequência de alelos de alguns genes nas populações de uma espécie (Fisher, 1930). As contribuições de Fisher nesses campos culminaram, dentre outras coisas, na já mencionada teoria sintética da evolução, ainda considerada como um paradigma atual na biologia. Trazendo para o contexto deste capítulo, nesta parte de sua obra, Fisher desenvolveu e analisou alguns modelos matemáticos de equação diferencial, dentre eles o tradicional modelo de reação-difusão – porém aplicando-o à genética de populações (Fisher, 1937). Este componente do programa de pesquisa fisheriano voltará a ser discutido na seção seguinte<sup>16</sup>.

No capítulo anterior, mostrei como questões similares referentes ao componente empírico do processo de construção do conhecimento científico foram debatidas entre os filósofos da ciência. Naquele momento, foquei minha atenção no debate filosófico tal qual analisado dentro da perspectiva convencional fortemente enviesada em como a ciência transcorreu na física (incluo aqui a astronomia). Nesta seção, procurei deixar claro que o problema empiricista ganhou um outro formato nas ciências biológicas com a introdução dos conceitos de variabilidade, amostragem e teste de hipóteses nulas<sup>17</sup>. Neste momento, acredito que a relação existente entre matemática, modelagem e epistemologia esteja mais clara

---

<sup>16</sup>Porém, sem o enfoque em Fisher, mas sim no contexto da ecologia de populações.

<sup>17</sup>Discutir as causas das diferenças entre biologia e a física está fora do escopo específico desta tese. Esta é uma discussão longa na literatura que não conseguiria resumir rapidamente aqui. Diante do que apresentei e do que ainda apresentarei a seguir, considero válido assumir momentaneamente que distinções entre estes campos de conhecimento científico podem decorrer do fato de físicos e biólogos muitas vezes serem motivados por questões de tipo diferente – independente da matéria ou dos sistemas estudados em ambas as disciplinas serem ou não definidos por propriedades fundamentalmente distintas (*e.g.* Mayr, 1996). Tipos diferentes de questão restringirão, mais ou menos, o tipo de resposta que será considerada adequada para a questão, assim como os procedimentos epistêmicos que serão considerados válidos para respondê-la. Devo deixar claro que não estou afirmando que existem tipos de questões que possam ser respondidos somente em uma das disciplinas, mas estou supondo que talvez físicos e biólogos priorizem tipos de questões diferentes em suas atividades.

ao leitor. As principais controvérsias epistemológicas que venho discutindo desde o início desta tese podem ser encaradas como um problema de descrição racional da inter-relação entre *teoria* e *empíria* na construção do conhecimento científico, mais especificamente do conhecimento ecológico. Concluo esta seção, ressaltando três aspectos que sumarizam o que fora apresentado:

1. A maioria, se não todas as variáveis estudadas empiricamente na biologia são aleatórias, probabilísticas ou estocásticas (três termos muitas vezes usados para definir uma oposição ao determinismo).
2. A teoria e modelagem estatística é um campo do conhecimento que ajudou o biólogo a i) descrever padrões contidos nos dados que coleta da natureza, ii) a analisar suas evidências e iii) a justificar suas inferências e conclusões teóricas com base em observações empíricas.
3. Em conjunto, a obra de Pearson e, principalmente, de Fisher foram fundamentais para o avanço teórico-empírico em todos os ramos das ciências biológicas no século XX. Fisher foi um matemático que se mostrou eclético e que agregou num mesmo programa geral de pesquisa três métodos ou, como prefiro chamar neste caso, epistemes bastante distintas. Epistemes estas que, como venho chamando a atenção desde o começo desta tese, foram alvo de inúmeras controvérsias filosóficas ao longo dos séculos.

Não podemos afirmar que as teorias propostas por Fisher são verdadeiras ou corretas, mas também não podemos negar que pelo menos algum aspecto de sua filosofia está presente no programa de pesquisa de qualquer ecólogo contemporâneo. Ademais, não podemos negar que a obra de Fisher ajudou a trazer efetivamente as questões epistemológicas fundamentais – algo que era essencialmente debatido entre filósofos da ciência, alguns matemáticos e poucos físicos – para o universo do biólogo<sup>18</sup>.

### **3.2 Equações diferenciais, algoritmos de simulação e as limitações da modelagem espaço-temporal de sistemas dinâmicos estocásticos**

Idealmente, os dois componentes gerais que definem a atividade científica – a teoria e a empíria – deveriam andar juntos na composição do programa de pesquisa de um ecólogo. Porém, podemos notar

---

<sup>18</sup>Na ecologia em específico, as ideias de Fisher fundamentam, mesmo que implicitamente, a argumentação de diversos ecólogos (*e.g.* Simberloff e Peters) no grande debate epistemológico da ecologia no final do século XX discutido nos capítulos anteriores.

que estes dois componentes são abordados de forma fragmentada na literatura em ecologia, com alguns pesquisadores focados na parte empírica e outros em desenvolver a parte teórico-matemática da disciplina. Poucos são aqueles que desenvolvem programas de pesquisa abrangentes, como Fisher. Na seção anterior, concentrei-me em discutir como os biólogos e ecólogos usaram modelos para lidar com o componente empírico de sua atividade. Neste sentido, explorei mais o aspecto envolvido na descrição de padrões existentes em dados empíricos e no processo de formulação de hipóteses estatísticas para avaliar a evidência contida nas observações. Procurei mostrar que a derivação de hipóteses estatísticas com base em conjecturas teóricas mais fenomenológicas é uma prática comum na ciência, especialmente na biologia em que seus pesquisadores frequentemente desenvolvem um viés empírico muito forte em seus programas de pesquisa. Nesta seção, voltarei minha atenção à uma perspectiva menos direcionada às questões referentes aos testes das hipóteses científicas, mas mais atenta ao processo de conjectura destas hipóteses e de construção de teorias mais representacionais (*sensu* Gewandsznajder, 1989). Neste contexto, algo que um cientista busca saber é porque algum padrão é como é, ou porque um dado fenômeno ocorre na natureza. Em outras palavras, o pesquisador interessado nesta problemática procurará entender os processos que regulam a dinâmica de um sistema ecológico para, assim, explicar os *mecanismos* que produzem os padrões observados ou que geram um determinado fenômeno em questão.

No capítulo 1, mostrei que a disciplina conhecida como ecologia de populações despontou no contexto científico no começo da década de 1920. Esta disciplina incorporou a matemática como meio de produzir novas teorias que descrevessem e explicassem as “*complexas inter-relações referidas por Darwin como as condições para a luta pela existência*”. Neste momento, a ecologia ganhou uma importante ferramenta para elaboração de novas teorias e hipóteses que os físicos já vinham usando há muito tempo para resolver seus problemas (Kingsland, 1985; Cooper, 2003), pelo menos desde Laplace<sup>19</sup>. No final da década de 1980, a abordagem de simulações computacionais passou a compor, junto com a tradicional modelagem por equações diferenciais, o conjunto de ferramentas disponíveis ao ecólogo teórico em seus estudos de sistemas dinâmicos, o que veio a motivar mais uma controvérsia filosófica no cenário atual da ecologia. Na pequena revisão sobre a modelagem matemática em ecologia de populações que apresentarei a seguir, focarei minha atenção em deflagrar as limitações destas duas abordagens

---

<sup>19</sup>No capítulo anterior, cito exemplos do uso da matemática entre os físicos modernos, especialmente por Newton. Laplace foi responsável por traduzir toda a teoria mecânica de Newton, concebida e apresentada em uma linguagem de sistemas geométricos, para uma teoria baseada numa linguagem de sistemas de equações diferenciais (Gotelli e Ellison, 2004, p. 53).

de modelagem em questão, a fim de mostrar o quão contra-intuitivo pode ser abdicar de uma abordagem de modelagem alegando apenas suas limitações como justificativa. Para isso, usarei duas dificuldades tipicamente enfrentadas por quem estuda teorias de sistemas dinâmicos, as quais ajudarão o leitor a compreender a problemática em jogo, com referências concretas que a ilustram. Estes problemas são: i) a inclusão explícita do componente espacial em modelos de dinâmica de populações e ii) a adoção de um ponto de vista estocástico sobre os processos que regulam a dinâmica, em contraposição ao determinismo tradicional.

### 3.2.1 Modelos de equação diferencial em ecologia de populações

Uma das principais ferramentas que a matemática disponibilizou ao cientista foi, sem dúvida, o cálculo diferencial. Costuma-se considerar que a modelagem matemática por meio de equações diferenciais<sup>20</sup> possui pelo menos duas propriedades interessantes em termos heurísticos, que tornam esta abordagem muito útil (eficiente) na aplicação do raciocínio dedutivo em resoluções de problemas envolvendo sistemas dinâmicos:

1. Modelos de equação diferencial resumem uma longa história sobre um dado sistema de interesse, traduzindo-a para a linguagem simbólica, curta e abstrata da matemática. Mais especificamente, o pesquisador é capaz de transformar um conjunto geralmente pequeno de premissas verbais que definem o sistema de estudo em relações matemáticas entre as variáveis de estado, as variáveis descritoras e alguns parâmetros que contêm informações sobre os processos que regulam o sistema em questão. Neste sentido, as equações podem ser vistas como uma nova premissa sintética de um raciocínio dedutivo que fornecerá uma conclusão inequívoca sobre o comportamento do sistema estudado (*i.e.* a solução da equação diferencial).
2. Equações diferenciais podem ser resolvidas por meio de métodos analíticos de integração. Isto significa que a matemática garante que uma solução exata para a função que descreve a variável de estado do sistema (*e.g.* o tamanho de uma população em função do tempo) pode ser obtida. Desta forma, as soluções de modelos de equação diferencial nada mais são que funções que predizem

---

<sup>20</sup>Devo notar aqui que a matemática possui diversas abordagens metodológicas para resolver seus problemas e todas elas tem estas propriedades que destacarei. Aqui estou ressaltando a abordagem de equações diferenciais porque foi esta que se tornou tradicional na maioria dos artigos teóricos em ecologia. A título de exemplo, poderia citar a modelagem matricial, também usada em muitos trabalhos em ecologia de populações (Caswell, 2001)

exatamente o estado do sistema modelado, dado os processos que o regulam<sup>21</sup>.

Como discutido no capítulo anterior, o drama do cientista natural é que elaborações matemáticas puras como as descritas acima continuam num nível abstrato para alguém que possui uma demanda intrínseca de *verificação* ou, mais precisamente, de justificação empírica de suas teorias. Embora a solução de uma equação diferencial seja inequívoca, não existem meios racionais que garantam sua aplicação como descrição ou explicação científica para os fenômenos naturais; os sistemas dinâmicos numa concepção puramente matemática são hipotéticos para o cientista natural. Portanto, a episteme matemático-dedutiva deve ser vista como um elemento conjectural do processo científico, a partir do qual hipóteses testáveis podem ser geradas. A necessidade que um cientista natural tem de testar empiricamente as hipóteses que gera traz à tona o hipotético-dedutivismo e os problemas heurísticos associados ao uso deste raciocínio na ecologia (como a operacionalização de uma variável abstrata e não observável; veja capítulo 2).

Outro aspecto que deve ser lembrado ao descrever a abordagem matemática é que o modelador convencionalmente usa uma heurística baseada na construção de modelos simples (*i.e.* baseados em princípios fundamentais e gerais), os quais podem ser derivados em modelos mais complicados conforme a necessidade (*i.e.* quando um modelo mais simples não satisfaz as demandas do pesquisador)<sup>22</sup>. Contudo, nada impede um modelador teórico de usar uma heurística oposta, na qual ele constrói modelos complexos e os simplifica conforme evidências empíricas mostrem a irrelevância de alguns processos ou mecanismos inicialmente levados em conta. Esta é uma abordagem similar à que passou a ser utilizada na modelagem por simulações computacionais (Grimm, 1999). As limitações destas duas heurísticas para a modelagem de sistemas dinâmicos em ecologia de populações serão discutidas nesta e na próxima subseção, preparando o leitor para o capítulo seguinte, em que apresentarei uma proposta possível de programa de pesquisa em ecologia baseado em um pluralismo epistêmico-heurístico.

Nesta subseção concentrarei-me em discorrer sobre a heurística *nomotética* - como chamarei a abordagem focada em princípios gerais. Uma confusão muito comum entre os cientistas deve ser evitada

---

<sup>21</sup>Deve-se destacar que equações diferenciais também podem ser analisadas para determinarmos propriedades qualitativas do sistema de estudo, como seus pontos de equilíbrio (caso existam) e a estabilidade deste equilíbrio (May e McLean, 2007).

<sup>22</sup>Neste momento entra em jogo um dos componentes subjetivos, mas também criativos, do processo científico - as demandas do pesquisador, um tema também discutido no capítulo 2. Apenas para relembrar o leitor, estas demandas estão relacionadas a aspectos psicológico-cognitivos, pedagógico-formativos e histórico-sociais. Estes temas de extrema complexidade não foram aprofundados nesta tese, mas sem dúvida merecem ser melhor explorados em estudos futuros para que atinjamos um conhecimento mais abrangente e global sobre o que é ciência.



para compreendermos claramente esta heurística. Modelo simples não é o mesmo que modelo geral. Modelos simples são aqueles que descrevem sistemas com o mínimo de forças ou processos reguladores e que são formulados com base em princípios ou leis gerais (*e.g.* Turchin, 2001). Como discutido no capítulo anterior, leis gerais frequentemente são afirmações de conteúdo amplo portanto, de baixo conteúdo preditivo. Por sua vez, modelos gerais são aqueles cuja estrutura inclui os modelos simples como casos particulares<sup>23</sup>. Dado este esclarecimento inicial, vejamos como a teoria em ecologia de populações se desenvolveu historicamente.

As raízes da modelagem matemática nesta disciplina se encontram nos trabalhos de Leonhard Euler com exponenciais e logaritmos, em meados do século XVIII, nos quais há a derivação de uma fórmula matemática para o crescimento discreto de populações, chamada de crescimento geométrico (Bacaër, 2011). Inspirado em prever o tamanho de uma população (no caso da população de Berlim) em um dado tempo futuro (*e.g.* em 100 anos), Euler assumiu que os dois únicos processos que afetariam o crescimento populacional seriam os nascimentos e mortes de indivíduos. Com isso, este matemático formulou a seguinte equação de diferença<sup>24</sup>:

$$N_{t+1} = N_t + bN_t - dN_t = N_t + (b - d)N_t \quad (3.7)$$

em que  $N_t$  é o tamanho populacional em um dado tempo  $t$ ,  $b$  é a taxa anual de nascimentos e  $d$  é a taxa anual de mortes<sup>25</sup>. Se considerarmos que  $b - d$  é a taxa de crescimento da população ( $r$ ) a Eq. 3.7 pode ser expressa como:

$$N_{t+1} = (1 + r) N_t \quad (3.8)$$

---

<sup>23</sup>Evans et al. (2013, p. 581) descrevem de maneira muito elucidativa esta confusão ao afirmarem que: “*uma equação não linear de crescimento populacional como  $\frac{dN}{dt} = \alpha N + \beta N^{1+a}$  representa uma grande família de modelos, cujos membros correspondem aos parâmetros constantes  $\alpha$  e  $\beta$  ajustados para valores particulares (tal que  $\alpha$  pode assumir qualquer valor). Se  $\beta$  é igual a 0, obtemos a equação linear simples  $\frac{dN}{dt} = \alpha N$ . Obviamente, a equação não linear inclui a linear como um caso especial. Então, a equação mais complexa representa uma família mais ampla de modelos que a linear e, portanto, é mais geral. Ela pode [descrever] todos sistemas reais que são descritos pela equação linear mais uma amplitude de outros [sistemas].*”

<sup>24</sup>Equação de diferença é aquela em que a variável preditora assume apenas valores discretos, *e.g.* inteiros positivos.

<sup>25</sup>Os símbolos usados nas equações serão mantidos ao longo de todo o texto, portanto só serão descritos na primeira vez que aparecerem neste capítulo.

cuja solução analítica é  $N_t = (1 + r)^t N_0$ , em que  $N_0$  é o tamanho inicial da população<sup>26</sup>. Por exemplo, Euler considerou a população de Berlim em 1747 como condição inicial (*i.e.*  $N_0 = 107.224$  habitantes) e assumiu que  $r = 1/30$  para estimar a população de Berlim em 1847 como sendo igual a  $N_{t=100} = 2.654.874$  habitantes, o que parecia condizente com as estimativas demográficas de Londres para aquele intervalo de tempo (Bacaër, 2011).

A formulação discreta para o problema demográfico proposta por Euler pode ser facilmente transformada em uma formulação contínua com o auxílio das ferramentas do cálculo diferencial. Tomando a noção de limites e assumindo um intervalo de tempo arbitrariamente pequeno, podemos facilmente derivar uma equação diferencial em que a variável independente  $t$  é tratada como contínua, como segue abaixo:

$$N_{t+1} - N_t = rN_t \quad (3.9)$$

$$\frac{N_{t+\Delta t} - N_t}{\Delta t} = \frac{rN_t}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Assim, basta calcularmos o limite

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_{t+\Delta t} - N_t}{\Delta t} = rN_t \quad (3.11)$$

para chegarmos à seguinte equação diferencial:

$$\frac{dN_t}{dt} = rN_t \quad (3.12)$$

cuja solução pode ser obtida analiticamente e é dada pela função abaixo,

$$N_t = N_0 e^{rt} \quad (3.13)$$

em que  $e$  é uma constante conhecida como número de Euler ( $e \approx 2,7183$ ).

---

<sup>26</sup>Note que esta solução é idêntica à fórmula de juros composto, amplamente usada no contexto econômico. Em seus estudos, Euler apresentou vários exemplos que contextualizaram sua análise sobre logaritmos e exponenciais. Dentre esses exemplos, o matemático usou a mesma formulação da Eq. 3.8 para resolver um problema de pagamento de empréstimo a juros (Bacaër, 2011).

A Eq. 3.12 é uma forma matemática simples de se expressar a dinâmica de uma população baseada unicamente em dois dos processos mais gerais da biologia e considerados como um princípio universal da disciplina, *i.e.* o de que qualquer indivíduo, seja de qual for a espécie, nasce e morre. Entretanto, foi com o ensaio do reverendo Thomas R. Malthus sobre demografia humana em 1798<sup>27</sup> que a compreensão de padrões na dinâmica de populações se tornou um assunto de grande destaque fora do âmbito da matemática. Talvez a principal conclusão de Malthus, frequentemente mencionada na literatura, tenha sido que as populações humanas tendem a crescer geometricamente enquanto os recursos que geram a subsistência da humanidade crescem aritmeticamente. A teoria de Malthus inspirou muitos cientistas<sup>28</sup> a se engajarem no entendimento de porque populações não crescem indefinidamente. Interessado no problema levantado por Malthus, o matemático Pierre-François Verhulst propôs no começo do século XIX o que veio a se tornar uma das mais importantes equações para descrever o crescimento de uma população, a equação logística (Kingsland, 1982; Getz, 1998), definida abaixo:

$$\frac{dN_t}{dt} = rN_t \left(1 - \frac{N_t}{K}\right) \quad (3.14)$$

em que  $N_t$  é o tamanho populacional no tempo  $t$ ,  $r$  é a taxa basal de crescimento populacional e  $K$  é o que convencionou-se chamar de *capacidade suporte*.  $K$  tem uma definição vaga dada sua natureza fenomenológica, mas é comumente interpretado como o número máximo de indivíduos que pode ser mantido em uma população em decorrência da limitação espacial ou de recursos no ambiente. Assim como no caso do modelo de crescimento exponencial, o modelo de Verhulst é outro caso raro na modelagem de sistemas dinâmicos em que há uma solução analítica para a equação diferencial usada. Esta solução é,

$$N_t = \frac{K}{1 + be^{rt}} \quad (3.15)$$

em que  $b = \frac{K-N_0}{N_0 e^{2rt}}$  e  $N_0$  é o tamanho inicial da população. No próximo capítulo, este modelo será abordado detalhadamente. Por enquanto, mantere-me na linha historiográfica do desenvolvimento da modelagem matemática de sistemas dinâmicos por meio de equações diferenciais.

---

<sup>27</sup>*An essay on the principle of population.*

<sup>28</sup>Darwin, como vimos no capítulo 1, foi um desses cientistas. Ele usou a teoria de Malthus, considerada uma lei da natureza, como premissa para *deduzir* sua teoria da origem das espécies por seleção natural (veja seção 1.1).

Curiosamente, o trabalho de Verhulst permaneceu desconhecido na ecologia até a década de 1920, quando Pearl o *redescobre* (Kingsland, 1985; Turchin, 2003). Há de se ressaltar que Pearl chegou, independentemente, às mesmas conclusões de Verhulst sobre a curva logística como uma representação adequada da variação temporal no tamanho de uma população (neste caso usando censos da população norte-americana entre 1790 e 1910 como dados concretos). Porém, Pearl não usou os métodos analíticos de equações diferenciais como Verhulst, mas sim um método algébrico de ajuste de curvas à dados (Pearl e Reed, 1920; Turchin, 2003). Tendo o problema de Malthus em mente, Pearl e Reed (1920) buscavam alguma função cuja forma indicaria uma limitação ao crescimento da população conforme esta aumentasse. Dentre outras características, esses autores procuravam uma curva que apresentasse uma forma “*concava para cima*” enquanto o tamanho da população fosse baixo, e “*concava para baixo*” quando a população crescesse acima de um dado número de indivíduos (Pearl e Reed, 1920, p. 281). Deste modo, a função logística se encaixou perfeitamente à proposta de Pearl e Reed<sup>29</sup>.

Pearl foi um grande disseminador da concepção de denso-dependência como um fator fundamental da dinâmica de uma população (seção 1.2). Neste sentido, além de analiticamente tratável a equação logística revela outros padrões interessantes, como o de que haverá crescimento aproximadamente exponencial ao longo do tempo enquanto a população for pequena em relação à capacidade suporte ( $N_t \lll K$ ). Basicamente, o que vemos é que o modelo logístico generaliza o caso simples de um sistema em que a população cresce exponencialmente (isto ocorre no limite em que  $1 - \frac{N_t}{K} \rightarrow 1$ ). O resgate do modelo logístico por Pearl influenciou muitos estudos em ecologia de populações que o sucederam (Kingsland, 1982). O exemplo clássico é o modelo de competição inter-específica de Lotka e Volterra, pelo qual o crescimento populacional de uma dada espécie, num dado momento, depende tanto da densidade de sua população como da densidade populacional de seu competidor. Este modelo é uma simples derivação do modelo logístico que inclui um termo a mais referente ao efeito da interação entre competidores na dinâmica de crescimento de suas populações<sup>30</sup>.

---

<sup>29</sup>Note a semelhança entre a abordagem de Pearl e a abordagem dos empiricistas do século XVII, como a de Newton ao propor sua lei gravitacional universal (seção 2.2). Pearl, contudo, estava interessado num sistema bem mais restrito (populações humanas) se comparado com o sistema de Newton (o universo). Por outro lado, poderíamos colocar Verhulst dentre os racionalistas, visto que ele desenvolveu um modelo a partir de um raciocínio mais abstrato e conceitual, sem o interesse prévio em ajustar uma função a dados observados, mas sim deduzí-la a partir de uma equação diferencial que pudesse representar os processos populacionais.

<sup>30</sup>Deve-se notar que o modelo de Lotka e Volterra é a versão mais simples para o problema de competição como mecanismo estruturador de comunidades ecológicas. Por este modelo, assume-se que existem apenas duas espécies no sistema que competem pelo mesmo recurso. Alguns detalhes básicos desta formulação podem ser obtidos em Turchin (2003) e em Gotelli (2007).

Embora tenha promovido avanços conceituais importantes, algumas limitações da Eq. 3.14 merecem ser destacadas aqui. A primeira é que a população jamais atinge sua densidade ou tamanho máximo pelo modelo logístico, uma vez que isso só é previsto para um tempo infinito (*i.e.*  $N \rightarrow K$  quando  $t \rightarrow \infty$ ). A segunda é que, assumindo-se uma taxa basal de crescimento positiva (*i.e.*  $r > 0$ ), o estado de extinção de uma população também nunca ocorre efetivamente (*i.e.*  $N \rightarrow 0$  quando  $t \rightarrow -\infty$ )<sup>31</sup>. Essas limitações deflagram um problema prático para o ecólogo, o de traduzir teorias e hipóteses representacionais envolvendo conceitos abstratos como o de limite e de infinito em hipóteses empiricamente testáveis e que façam sentido ecológico. Este problema é intrínseco da abordagem de modelagem por equações diferenciais, as variáveis de estado do modelo são contínuas (no caso dos modelos populacionais, a variável de estado é o tamanho ou densidade da população). Desta forma, o tamanho de uma população pode assumir valores fracionários arbitrariamente precisos de tal forma que sempre haja um proporção infinitesimalmente pequena que este tamanho pode aumentar (ou diminuir) antes de atingir  $K$ . Embora possa parecer um detalhe irrelevante para um matemático ou físico com suas concepções mais abstratas de um sistema populacional, a limitação acima levantada incomoda alguns ecólogos, afinal o conceito de extinção está presente em diversas teorias ecológicas e evolutivas.

Soluções para problemas técnicos como o da extinção no modelo logístico envolvem necessariamente a alteração ou adição de premissas ao modelo, que podem implicar em uma mudança completa em sua estrutura (*e.g.* uma formulação discreta por equações de diferença ou integro-diferenciais). Por exemplo, Warder C. Allee propôs um modelo muito elegante que solucionou o problema de extinção do modelo logístico. Interessado em entender os padrões de agregação animal, ele observou que a denso-dependência na taxa de crescimento populacional poderia não ser linear (Allee, 1931; Allee et al., 1949), como ocorre no modelo logístico. Por exemplo, esse fenômeno é frequentemente atribuído a espécies com reprodução sexual já que as taxas de encontros entre machos e fêmeas pode decrescer desproporcionalmente com a diminuição da densidade populacional. Uma forma não exatamente mecanística, porém convencional, de lidar com a variação não linear do efeito da denso-dependência no crescimento populacional consiste em adicionar um termo à Eq. 3.14 (*e.g.* Amarasekare, 1998), como mostrado abaixo:

$$\frac{dN_t}{dt} = rN_t \left(1 - \frac{N_t}{K}\right) \left(\frac{N_t}{K} - \frac{A}{K}\right) \quad (3.16)$$

---

<sup>31</sup>Vale destacar que este é o mesmo problema observado para o modelo de crescimento exponencial, pelo qual uma população nunca atinge o valor  $N_t = 0$ . A rigor, esta afirmação é válida mesmo se considerarmos uma taxa de crescimento basal negativa (*i.e.* a taxa de mortalidade é maior que a de natalidade,  $r < 0$ ).

em que  $A$  é o tamanho populacional ( $0 < A < K$ ) abaixo do qual o crescimento populacional é negativo ( $\frac{dN_t}{dt} < 0$ ) devido ao efeito Allee. Em outras palavras, a população entra em extinção quando  $N_t < A$ . Esta formulação do problema por Allee foi marcante para a teoria em ecologia de populações. Ela não apenas trouxe a noção de limiares de extinção na dinâmica de populações como também mostrou que este limiar demográfico pode ser obtido pela simples análise qualitativa do modelo. Entretanto, estas propriedades interessantes da modelagem matemática por equações diferenciais não devem esconder outras limitações ainda mais relevantes desta abordagem, além do problema de valores inteiros para a variável resposta do modelo.

Na época de Allee, os ecólogos teóricos estavam engajados em desenvolver modelos de dinâmica sem considerar explicitamente a dimensão espacial em suas formulações. Esta negligência se explica, em parte, pelo fato da inclusão da dimensão espacial em um modelo – mesmo em sua formulação mais simples, como veremos adiante – implicar em complicações que dificultam bastante seu tratamento analítico. Dinâmicas espaço-temporais envolvem o uso de equações diferenciais parciais, dado que, neste caso, devemos levar em conta duas variáveis preditoras da dinâmica na formulação do modelo, o tempo e o espaço. Contudo, o conceito de espaço já estava presente na teoria ecológica de muitos dos naturalistas expedicionários. Por exemplo, a noção de que a distribuição espaço-temporal de uma espécie é limitada pela dispersão de seus indivíduos era conhecida e estudada ao menos desde o século XIX com a biogeografia de Wallace (1880). Além disso, o padrão agregado de distribuição espacial de algumas espécies de plantas em uma parcela amostral de tamanho fixo já era algo conhecido por Gleason desde a década de 1920, como destaquei anteriormente. Isto evidencia a fragilidade da premissa de distribuição aleatória dos indivíduos, adotada na maioria (se não em todos) os modelos de dinâmica de populações da época como justificativa para desconsiderar a dimensão espacial no sistema. Para que os efeitos teóricos da dispersão na (re)distribuição espacial dos indivíduos e, portanto, na demografia de uma espécie pudessem ser estudados apropriadamente, incluir a dimensão espacial na formulação de modelos de dinâmica de populações se tornou inevitável (Okubo e Levin, 1980; Turchin, 1998; Bowler e Benton, 2005).

John G. Skellam publicou um artigo seminal para a ecologia de populações em 1951, no qual ele propôs um modelo que resolveu parcialmente o problema da dimensão espacial (Skellam, 1951). Sua formulação é a mesma dos modelos de reação-difusão usados na física de reações moleculares. O componente de reação do modelo de Skellam é dado pela dinâmica de crescimento populacional (*e.g.* cresci-

mento exponencial, logístico) e seu componente de difusão é dado por uma dinâmica de movimentação dos indivíduos por meio de uma caminhada aleatória. Este modelo está representado na equação abaixo,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + ru \left( 1 - \frac{u}{K_u} \right) \quad (3.17)$$

em que,  $u$  é a densidade populacional no tempo  $t$  e na coordenada  $(x, y)$  de um plano cartesiano,  $D$  é o coeficiente de difusão (uma medida da magnitude com que uma população se espalha no espaço) e  $K_u$  é a densidade máxima de indivíduos que um dado local  $(x, y)$  comporta. Com esse modelo, Skellam foi capaz de estabelecer diversas previsões qualitativas sobre o comportamento espaço-temporal de uma população<sup>32</sup>. Duas dessas previsões foram a velocidade de invasão da população<sup>33</sup> e um limiar de extinção espacial<sup>34</sup>, dado por uma relação particular entre os parâmetros  $r$  e  $D$ . O modelo de Skellam pode ser considerado, portanto, o modelo mais simples de dinâmica espaço-temporal de populações. No entanto, variações desta estrutura mínima são muito complicadas analiticamente e algumas delas intratáveis (Turchin, 1998).

Em decorrência da limitação apresentada acima, extensões do modelo de Skellam foram negligenciadas na literatura ecológica (mas veja Turchin, 1998; Okubo e Levin, 2001; Cantrell e Cosner, 2004). O que se observou historicamente, foi a ampla disseminação de uma concepção mais simplificada da dinâmica espacial de populações apresentada por Levins (1969) em sua teoria de metapopulações. Em modelos de metapopulação, o espaço é composto por manchas de habitat e a variável resposta de interesse é a proporção de manchas ocupadas nesta paisagem, ao invés do tamanho da população. Desta forma, uma metapopulação é um conjunto de populações que habitam manchas distintas e que são reguladas por dois parâmetros gerais, as taxas de extinção local ( $\epsilon$ ) e de colonização ( $c$ ; uma medida de intensidade do fluxo de indivíduos ou propágulos entre as manchas). O modelo de Levins é, portanto, a

---

<sup>32</sup>Neste momento é necessário notar que o modelo de reação-difusão já havia sido usado e analisado por (Fisher, 1937) no contexto da genética de populações mais de uma década antes de Skellam publicar seu artigo.

<sup>33</sup>Esta velocidade também é chamada de velocidade de propagação da frente de difusão

<sup>34</sup>Este limiar espacial de extinção é o tamanho crítico de uma mancha de habitat, homogênea e isolada, abaixo do qual a população que habita está inevitavelmente fadada à extinção. A explicação para este limiar é que dependendo dos valores dos parâmetros  $D$  e  $r$ , a população pode crescer em uma taxa mais lenta que a perda de indivíduos que se movimentam para fora da mancha e, conseqüentemente, morrem (Skellam usou uma condição de contorno absorviva, uma propriedade que será apresentada formalmente no capítulo seguinte).

representação mais simples da dinâmica de uma metapopulação, sendo expresso pela equação abaixo:

$$\frac{dP}{dt} = cP(1 - P) - \epsilon P \quad (3.18)$$

em que  $P$  é a proporção de manchas ocupadas. Podemos notar que esta formulação é análoga à do modelo de crescimento logístico sem espaço<sup>35</sup>.

A modificação na concepção do problema imposta pela teoria metapopulacional facilitou o processo analítico dos modelos. Por exemplo, uma simples análise qualitativa do modelo de Levins nos revela um novo limiar de extinção, pois neste modelo  $P = 0$  (*i.e.* a metapopulação se extingue) se a taxa de extinção local for maior que a taxa de colonização (Levins, 1969). Porém devo ressaltar que o modelo clássico de Levins é baseado em premissas extremamente simplificadas (*e.g.* a dinâmica interna das manchas pode ser desprezada e todas as manchas são iguais em tamanho e equidistantes, ou seja,  $c$  e  $\epsilon$  são constantes para qualquer mancha<sup>36</sup>) que, apesar de atraentes do ponto de vista heurístico, são muito irrealistas. De maneira similar ao que se observou com o modelo logístico, o modelo de Levins serviu de bases para muitas derivações de modelos metapopulacionais mais realistas (Lande, 1987; Hanski e Gilpin, 1997). Os estudos de Ilka Hanski foram fundamentais para o desenvolvimento da teoria de metapopulações e são bons exemplos de modelos matemáticos testados empiricamente (Hanski, 1998). Por exemplo, Hanski e Ovaskainen (2000) relaxaram a premissa de espaço implícito do modelo de Levins para formular um modelo de metapopulação capaz de prever um limiar de extinção dado por um valor crítico de *capacidade da metapopulação*, um parâmetro que sintetiza a informação a respeito da cobertura e configuração do habitat na paisagem em uma única medida.

Dada esta pequena introdução às dificuldades relacionadas à inclusão da dimensão espacial em modelos de dinâmica de populações, cabe também mencionar uma outra grande dificuldade enfrentada por aqueles que desenvolvem modelos de equações diferenciais: conceber uma formulação estocástica para a dinâmica que seja tratável analiticamente. Muitos ecólogos argumentam que os processos ecológicos possuem uma natureza estocástica e que este fator deve ser considerado nos modelos. Em ecologia de populações, estocasticidade demográfica se refere a eventos probabilísticos de mortalidade e/ou reprodução dos que são independentes entre os indivíduos que compõem a população. Comumente, considera-se que

---

<sup>35</sup>A eq.3.18 pode ser expressa da seguinte forma:  $\frac{dP}{dt} = (c - \epsilon)P - cP^2$ . Note a semelhança deste modelo com a eq. 3.14 que pode ser expressa como  $\frac{dN}{dt} = rN - \frac{r}{K}N^2$ .

<sup>36</sup>Isto implica que o espaço é implícito no modelo clássico de Levins.



estes processos se tornam relevantes quando o sistema modelado é pequeno (*i.e.* com um número finito de indivíduos; Renshaw, 1993; Lande et al., 2003), algo que é bastante comum em sistemas ecológicos. No entanto, deve-se notar que estudos recentes vem mostrando que os efeitos da estocasticidade não se limitam a tamanhos populacionais pequenos (Black e McKane, 2012). Por outro lado, a estocasticidade ambiental se refere a flutuações temporais nas taxas de mortalidade e natalidade devido a perturbações não predizíveis no ambiente (Lande et al., 2003). Neste caso, os efeitos da estocasticidade ambiental não dependem do tamanho da população.

Embora seja um conceito bastante relevante para os ecólogos (biólogos em geral), existe uma relutância em se considerar a estocasticidade em modelos de sistemas dinâmicos. Muito desta relutância é reflexo da perspectiva laplaciana de determinismo causal ter se disseminado fortemente entre muitos cientistas. Deste modo, a noção probabilística é ainda muito associada ao erro observacional e não aos processos que regulam uma dinâmica. Embora, possamos observar um engajamento recente de alguns pesquisadores (majoritariamente matemáticos e físicos) no desenvolvimento de modelos estocásticos de equação diferencial (*i.e.* equações mestre; Ovaskainen e Meerson, 2010; Black e McKane, 2012), avanços neste campo ainda são limitados e a literatura ainda é escassa na ecologia. A maioria destes modelos são extremamente difíceis de serem resolvidos mesmo com o uso de técnicas de aproximação numérica para a solução das equações (Black e McKane, 2012). Devo destacar também que compreender minimamente as técnicas e a linguagem usadas nestes artigos demanda um forte conhecimento prévio em matemática, algo incomum entre os ecólogos. Entretanto, estas limitações não foram suficientes para atravancar o avanço teórico em ecologia de populações. O desenvolvimento e análise de equações mestre ainda é uma área em plena expansão entre os matemáticos interessados em problemas aplicados à ecologia (Ovaskainen e Meerson, 2010). Ademais, a abordagem de modelagem por simulação vem sendo cada vez mais usada<sup>37</sup> como alternativa aos modelos de equação diferencial para modelar a dinâmica de populações (DeAngelis e Mooij, 2005). Este é o tema da próxima subseção.

---

<sup>37</sup>Particularmente, a partir dos finais da década de 1980

### 3.2.2 A empreitada da modelagem por simulações computacionais: o florescimento de uma nova controvérsia

Modelos de simulação são aqueles em que a dinâmica do sistema é dada por um algoritmo, *i.e.* um conjunto de “*operações elementares aplicadas iterativamente*” até que uma condição de término seja satisfeita (Gaucherel et al., 2011). Assim, a dinâmica de um sistema pode ser simulada por meio de rotinas de programação computacional. O uso de simulações em estudos ecológicos é relativamente recente se comparado com o quase centenário uso de equações diferenciais. A razão para isso é óbvia, precisamos de computadores para simular a maioria dos problemas científicos relevantes. Em decorrência do avanço tecnológico na engenharia de computadores observado depois da década de 1990, a modelagem por simulações vem gradualmente se disseminando em muitos ramos da ciência, incluindo a física que tradicionalmente se vale da abordagem de equações diferenciais (Grimm e Railsback, 2005; Winsberg, 2006). Neste momento é necessário fazer uma distinção em relação ao termo *simulação*, o qual possui diferentes significados na literatura. Para muitos físicos e matemáticos, simulação é uma técnica usada para se obter soluções numéricas para equações diferenciais (Ovaskainen e Meerson, 2010). Neste caso, define-se simulação como a implementação de um algoritmo que simula a evolução de uma dinâmica a fim de se obter soluções aproximadas para uma equação. Para estatísticos, uma simulação consiste em realizar procedimentos de reamostragem a fim de se obter uma distribuição nula de probabilidades para ser confrontada com os dados empíricos. Entretanto, para muitos ecólogos, o termo significa uma tentativa de *mimetizar* um mundo idealizado que represente o sistema de interesse do pesquisador (Evans et al., 2013). Nesta tese, o termo *simulação* é empregado especificamente em referência à esta terceira definição.

Modelos de simulação de sistemas dinâmicos que incluem explicitamente a dimensão espacial costumam ser divididos em duas classes, os eulerianos e os lagrangianos. Pela perspectiva euleriana, o modelo descreve as variáveis de estado (*e.g.* tamanho da população) em cada ponto no espaço<sup>38</sup>, enquanto que a perspectiva lagrangiana é centrada no indivíduo, portanto o modelo descreve o comportamento dos agentes que compõem o sistema (Turchin, 1998). Um exemplo típico de simulação euleriana é o automato celular, no qual o sistema é concebido como uma grade de células e as variáveis de estado são valores que estas células podem assumir (*e.g.* presença ou ausência de uma espécie, número de indivíduos de

---

<sup>38</sup>Basicamente, os modelos de equação diferencial são modelos eulerianos (Turchin, 1998; Getz, 2013).

uma espécie ou cobertura da vegetação). Desta forma, a dinâmica desses modelos é dada por regras que alteram os valores das células do automato. Por outro lado, os modelos baseados no indivíduo (comumente chamados de IBM<sup>39</sup>) são exemplos típicos de simulação lagrangiana. Nestes modelos, a dinâmica do sistema é dada pelas ações dos indivíduos, como suas movimentações pela paisagem e suas interações com outros agentes.

Diversos argumentos a favor do uso de simulações computacionais em estudos teóricos, especialmente do uso de modelos lagrangianos como os baseados nos indivíduos, foram apontados na literatura ecológica (Black e McKane, 2012). Aqui, destacarei três destes argumentos. O primeiro é que simulações são consideradas um meio mais apropriado para modelar sistemas complexos em ecologia e evolução (DeAngelis e Mooij, 2005; Grimm e Railsback, 2005). Sistemas complexos são aqueles compostos por muitos componentes interativos que, em muitos casos, são também adaptativos. Como consequência do grande número de intrincadas interações que caracterizam esses sistemas, suas dinâmicas geralmente resultam em propriedades emergentes que não podem ser preditas pela análise isolada de seus componentes (Grimm e Railsback, 2005). No entanto, a heurística usada em simulações computacionais geralmente facilitam a inclusão de interações complexas em um dado sistema de interesse. Esta propriedade heurística é marcante nos modelos baseados em indivíduos, pois é justamente a concepção lagrangiana dessa abordagem que permite uma modelagem mais *realista-mecanicista* das interações entre os indivíduos que compõem uma população ou uma comunidade ecológica. O segundo argumento é que modelos de simulação facilitam o estudo do efeito de processos estocásticos em dinâmicas ecológicas e evolutivas. Simulações de Monte Carlo, como comumente são chamadas as simulações computacionais de processos estocásticos markovianos (Ovaskainen e Meerson, 2010), não requerem técnicas analíticas complicadas como as do cálculo diferencial para serem analisadas. Estes modelos são analisados estatisticamente, o que nos leva ao terceiro argumento em favor da modelagem de sistemas dinâmicos por simulação computacional. Simulações podem ser concebidas dentro de uma estrutura de experimentação virtual (ou *in silico*) análoga a experimentos empíricos (*in vivo* ou *in vitro*; Winsberg, 2003). Nesta concepção de experimentos virtuais, a dinâmica do sistema é rodada em um mundo perfeitamente controlado para fatores de confusão. Portanto, os resultados de simulações computacionais podem ser analisados com as mesmas técnicas estatísticas aplicadas em estudos envolvendo experimentos empíricos ou observações de campo (Peck, 2004).

---

<sup>39</sup>Do inglês, *individual based models*

Apesar destes aspectos heurísticos interessantes, Getz (2013) salientou que o uso de simulações, como modelos baseados em indivíduos, em estudos de ecologia de populações cresceu a taxas ínfimas se comparadas com o crescimento em outros ramos científicos. Esta abordagem de modelagem vem recebendo diversas críticas por aqueles engajados na modelagem por equações diferenciais, o que dificulta uma disseminação ampla dos modelos de simulação na literatura teórica especializada (Evans et al., 2013). O que é visto como uma vantagem para o usuário da abordagem de simulação geralmente é visto como um problema para o usuário da abordagem de equações diferenciais (e vice-versa). Esta controvérsia pode ser sintetizada em três críticas principais. A primeira e óbvia crítica às simulações é que seus resultados são numéricos, ao contrário de modelos simples de equação diferencial tratáveis analiticamente que fornecem soluções gerais em formato de uma função matemática que relaciona as variáveis aos parâmetros do modelo (Ovaskainen e Meerson, 2010; Black e McKane, 2012). Para que se possa extrair dependências funcionais de modelos de simulação, é necessário que o espaço paramétrico dos modelos seja completamente explorado, o que é impossível matematicamente – a rigor, existem infinitas combinações de valores de parâmetros a serem avaliados. Neste caso, esta exploração é feita por meio de uma amostra de uma região de interesse do espaço de parâmetros do modelo (*e.g.* Chalom e Prado, 2012), convindo ressaltar que as dependências funcionais obtidas desta forma são relações estatísticas e não uma função matemática deduzida de uma equação. Embora relevante, esta crítica não é coerente o suficiente para colocar a modelagem por equações diferenciais em uma posição melhor. Como mencionado anteriormente, a maioria dos modelos de equações diferenciais necessitam de métodos numéricos de resolução, portanto padecem desta mesma limitação dos modelos de simulação.

A segunda crítica é que boa parte dos modelos de simulação são elaborados para resolver problemas muito específicos e por isso são formulados com um número excessivo de parâmetros, dificultando a interpretação e generalização dos resultados (Ovaskainen, 2008). Entretanto, esta não é uma crítica a um aspecto geral da modelagem por simulação, mas sim um problema específico do uso feito desta abordagem de modelagem. Esta crítica é particularmente relevante para uma classe de modelos baseados em indivíduos pela qual as simulações são concebidas dentro de uma perspectiva chamada de modelagem orientada a padrão<sup>40</sup> (*cf.* Grimm et al., 2005; Grimm e Railsback, 2005). Simplificadamente, modelagem orientada a padrão refere-se ao uso de padrões observados empiricamente na elaboração do conjunto de regras que definirão o algoritmo de simulação (Grimm e Railsback, 2012). Portanto, não se trata de uma

---

<sup>40</sup> *Pattern-oriented modeling* ou POM.

abordagem baseada em processos derivados de teorias representacionais simples e gerais, mas sim em processos descritos fenomenologicamente<sup>41</sup>.

Apesar das críticas, esta classe de IBMs se disseminou bastante entre os ecólogos, pois tem sido útil em resolver problemas ecológicos em escala mais local (*e.g.* no manejo adaptativo de gado em planícies semi-áridas Grimm e Railsback, 2012). Nestes casos, a intenção é resolver problemas específicos e não produzir uma teoria com alto nível de generalidade. O que quero deixar claro aqui é que a escolha de quantos e quais parâmetros entrarão na construção de um modelo é uma decisão do pesquisador, a qual decorre de seus interesses de estudo e de sua formação epistêmica. Não há restrições que impeçam um pesquisador de desenvolver modelos simples de simulação baseados em uma abordagem mais *orientada a processos gerais* (*i.e.* usando uma episteme semelhante à dos modeladores por equações). No entanto, devo destacar que uma modelagem por simulações *orientada a processos gerais* é um tópico raro, se não ausente na literatura teórica em ecologia de populações (Renshaw, 1993). Alguns esforços foram observados no fim da década de 1990, com o desenvolvimento de modelos de simulação eulerianos representando derivações de modelos metapopulacionais de equação diferencial, como o clássico de Levins (com Bascompte e Solé, 1996) e o territorial de Russell Lande (1987; com With e King, 1999). Contudo, essas simulações não foram delineadas com uma preocupação rigorosa em manter a estrutura conceitual dos modelos de equação que serviram de base para suas formulações (*e.g.* as simulações são em espaço e tempo discreto). Com isso, perde-se a oportunidade de uma análise mais detalhada das predições dos modelos de simulação, pois fica difícil compará-las com as predições dos modelos de equação correspondentes. Em caso de diferenças nas predições entre um modelo de equação e seu correspondente de simulação (*e.g.* entre o modelo de Lande e o modelo de With-King mencionados acima), como saber se elas se devem à diferente estrutura espaço-temporal ou à adição de uma complicação no sistema pelo modelo de simulação (*e.g.* um padrão diferente de dispersão entre as manchas de habitat, como With e King fizeram em relação ao modelo de Lande)?

Este é um problema bastante relevante atualmente, entender se e como modelos algorítmicos e de equações podem ser interconvertíveis, dado que as duas abordagens de modelagem possuem linguagens bem distintas. Alguns autores vem demonstrando que esta comunicação é possível em diversas situações porém existem casos de incompressibilidade em que a interconversão é impossível (*cf.* Gaucherel et al.,

---

<sup>41</sup>Para uma descrição mais detalhada sobre o que uma teoria *fenomenológica* e uma teoria *representacional*, sugiro a leitura de Gewandzajder (1989, p. 89–91).

2011). Um caso notável de compressibilidade são as simulações de Monte Carlo em espaço e tempo contínuo e as equações mestres. Estas duas abordagens de modelagem de sistemas estocásticos são “[...] derivadas das mesmas premissas markovianas, tal que existe uma correspondência exata entre elas” (Black e McKane, 2012, p. 339). Entretanto, enfatizo que as potencialidades desta estrutura conceitual de modelagem ainda foi muito pouco explorada na literatura teórica em ecologia (Renshaw, 1993).

A última crítica que resalto está atrelada à questão da linguagem dos modelos de simulação, mas agora em outro contexto, em referência ao problema de comunicação dos resultados obtidos por meio de modelos fundados na abordagem algorítmica. Modeladores diferentes podem desenvolver códigos de simulação distintos para resolver um mesmo problema. Ademais, existem inúmeras linguagens de programação disponíveis e frequentemente não conseguimos saber exatamente como nosso código se comunica com o processador do computador. Sendo assim, comparações entre diferentes estudos de simulação, assim como a descrição clara dos métodos de simulação usados são tópicos frequentemente problemáticos para usuários da abordagem algorítmica de modelagem. Este é mais um problema relevante e sobre o qual alguns pesquisadores vem se dedicando a solucionar. Propostas de protocolos para a comunicação eficiente dos resultados provenientes de modelos de simulação vem sendo publicadas recentemente (Peck, 2008; Grimm et al., 2010; Lorscheid et al., 2012). No entanto, nenhuma dessas propostas fora amplamente disseminada até hoje.

Um ponto que deve ser ressaltado nesta crítica referente à comunicação metodológica é que ela não é exclusiva dos modelos de simulação. Embora o significado de uma equação seja inequívoco (esta é uma propriedade matemática), sua compreensão não é livre de problemas semânticos. A maioria das equações diferenciais não são facilmente interpretáveis, principalmente por alguém desprovido de habilidades avançadas em matemática, como é o caso da maioria dos ecólogos. Além disso, a compreensão dos procedimentos analíticos pode ser muito difícil também, mesmo para equações simples como a de difusão (os livros de Renshaw, 1993; Cantrell e Cosner, 2004, são bons exemplos). Este problema é discutido por Fawcett e Higginson (2012), o qual mostrou i) que a densidade de equações em um artigo científico está negativamente correlacionada com sua taxa de citação e ii) que artigos densos em equações são predominantemente citados em periódicos com um forte escopo teórico. Estes autores argumentam que esta comunicação ineficiente entre matemáticos e ecólogos dificulta consideravelmente o desenvolvimento teórico em ecologia.

### 3.3 Conclusão

Após esta exposição crítica sobre a modelagem em estudos bio-ecológicos parece-me muito evidente que qualquer abordagem de modelagem tem limitações e *méritos*. Novamente, não vejo motivos claros e inequívocos que justifiquem uma ou outra abordagem. As controvérsias envolvidas na modelagem em ecologia, no entanto, se manifestam de maneira bem mais branda na literatura que os conflitos epistemológicos discutidos no capítulo 2 (*e.g.* a disputa observada com os posicionamentos de Peters e Murray). Um aspecto interessante, que será discutido no próximo capítulo, é que tanto o debate epistêmico geral do capítulo anterior quanto o debate relacionado às abordagens de modelagem se inter-relacionam. Podemos observar que as diferenças epistêmicas entre Peters e Murray se refletem nas diferenças epistêmicas entre os cientistas que se valem de uma abordagem predominantemente empírica e estatística ou aqueles que se limitam ao estudo teórico de sistemas dinâmicos em seus programas de pesquisa. Dentre aqueles que adotam uma perspectiva orientada à dinâmica de sistemas, pode-se dizer que os usuários da abordagem tradicional de equações se aproximam do pensamento de Murray. Entretanto, não é possível classificar os usuários de simulações computacionais nesta dicotomia, uma vez que esta abordagem de modelagem é extremamente versátil e é usada tanto pelos pesquisadores mais alinhados a Murray quanto por aqueles que se aproximam mais da visão de Peters. Devo notar que a ênfase dada às perspectivas de Murray e Peters se deve à necessidade de materializar a parte abstrata da discussão filosófica apresentada nesta tese. Deste modo, a discussão gerada em cima dos posicionamentos destes dois autores deve ser tomada como um exemplo entre outros tantos que podem ser encontrados na literatura ecológica (*cf.* McIntosh, 1985; Kingsland, 1985; Gotelli e Graves, 1996; El-Hani, 2006). Concluo que um desafio atual para os ecólogos continua sendo encontrar uma estratégia para superar os tópicos controversos discutidos até aqui e que continuam sem um consenso entre os cientistas. No próximo capítulo, darei um fechamento à esta tese apresentando uma proposta do que considero um programa de pesquisa científico que leva em conta os debates discutidos e que evidencia o pluralismo interepistêmico como característica fundamental.

### Bibliografia

Allee, W. 1931. *Animal aggregations: a study in general sociology*. – AMS Press.

- Allee, W., Park, O., Emerson, A., Park, T. e Schmidt, K. 1949. Principles of animal ecology. – Saunders Co.
- Almeida, M. 1999. Guerras culturais e relativismo cultural. – Revista Brasileira de Ciências Sociais 14(41): 5–14.
- Amarasekare, P. 1998. Allee effects in metapopulation dynamics. – The American Naturalist 152(2): 298–302.
- Bacaër, N. 2011. A Short History of Mathematical Population Dynamics. – Springer.
- Bascompte, J. e Solé, R. 1996. Habitat fragmentation and extinction thresholds in spatially explicit models. – Journal of Animal Ecology 65(4): 465–473.
- Black, A. J. e McKane, A. J. 2012. Stochastic formulation of ecological models and their applications. – Trends in ecology & evolution 27(6): 337–345.
- Bolker, B. 2008. Ecological Models and Data in R. – Princeton University Press.
- Bowler, D. E. e Benton, T. G. 2005. Causes and consequences of animal dispersal strategies: relating individual behaviour to spatial dynamics. – Biological Reviews 80(02): 205–225.
- Cantrell, R. e Cosner, C. 2004. Spatial Ecology via Reaction-Diffusion Equations. – Wiley Series in Mathematical & Computational Biology. Wiley.
- Caswell, H. 2001. Matrix Population Models: Construction, Analysis, and Interpretation. – Sinauer Associates.
- Chalom, A. e Prado, P. 2012. Parameter space exploration of ecological models. – arXiv preprint arXiv:1210.6278 .
- Connell, J. H. 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. – Science 199(4335): 1302–1310.
- Cooper, G. 2003. The Science of the Struggle for Existence: On the Foundations of Ecology. – Cambridge Studies in Philosophy and Biology. Cambridge University Press.
- Darwin, C. e Wallace, A. 1858. On the Tendency of Species to form Varieties; and on the Perpetuation of Varieties and Species by Natural Means of Selection.. – Journal of the Proceedings of the Linnean Society of London. Zoology 3(9): 45–62.



- DeAngelis, D. e Mooij, W. 2005. Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes. – *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 36: 147–168.
- Edwards, A. 1972. *Likelihood*. – Johns Hopkins University Press.
- El-Hani, C. 2006. Generalizações ecológicas. – *Oecologia Braziliensis* 10(1): 17–68.
- Evans, M., Grimm, V., Johst, K., Knuuttila, T., de Langhe, R., Lessells, C., Merz, M., O'Malley, M., Orzack, S., Weisberg, M., Wilkinson, D., Wolkenhauer, O. e Benton, T. 2013. Do simple models lead to generality in ecology?. – *Trends in Ecology and Evolution* 28(10): 578–583.
- Fawcett, T. e Higginson, A. 2012. Heavy use of equations impedes communication among biologists. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(29): 11735–11739.
- Fisher, R. 1930. *The genetical theory of natural selection*. – The Clarendon Press.
- Fisher, R. 1955. Statistical methods and scientific induction. – *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* pp. 69–78.
- Fisher, R. A. 1922. On the mathematical foundations of theoretical statistics. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 222: 309–368.
- 1935. The logic of inductive inference. – *Journal of the Royal Statistical Society* 98(1): 39–82.
- 1937. The wave of advance of advantageous genes. – *Annals of eugenics* 7(4): 355–369.
- Gaucherel, C., Bérard, S. e Munoz, F. 2011. Equation or Algorithm: Differences and Choosing Between Them. – *Acta Biotheoretica* 59(1): 67–79.
- Getz, W. 1998. An introspection of the art of modeling in population ecology. – *BioScience* 48(7): 540–552.
- 2013. Computational population biology: Linking the inner and outer worlds of organisms. – *Israel Journal of Ecology and Evolution* 59(1): 2–16.
- Gewandsznajder, F. 1989. *O método científico*. – Livraria Pioneira Editora.
- Godfrey-Smith, P. 2003. *Theory and Reality: An Introduction to the Philosophy of Science*. – Science and Its Conceptual Foundations series. University of Chicago Press.

- Gotelli, N. 2007. *Ecologia*. – Ed. Planta.
- Gotelli, N. e Ellison, A. 2004. *A Primer of Ecological Statistics*. – Sinauer Associates Publishers.
- Gotelli, N. e Graves, G. 1996. *Null models in ecology*. – Smithsonian Institution Press.
- Grimm, V. 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned and what could we learn in the future?. – *Ecological Modelling* 115(2-3): 129–148.
- Grimm, V., Berger, U., Deangelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J. e Railsback, S. F. 2010. The ODD protocol : A review and first update. – *Ecological Modelling* 221(23): 2760–2768.
- Grimm, V. e Railsback, S. 2005. *Individual-Based Modeling and Ecology*:. – Princeton Paperbacks. Princeton University Press.
- Grimm, V. e Railsback, S. F. 2012. Pattern-oriented modelling: a ‘multi-scope’ for predictive systems ecology. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 367(1586): 298–310.
- Grimm, V., Revilla, E., Berger, U., Jeltsch, F., Mooij, W., Railsback, S., Thulke, H.-H., Weiner, J., Wiegand, T. e DeAngelis, D. 2005. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: Lessons from ecology. – *Science* 310(5750): 987–991.
- Hanski, I. 1998. Metapopulation dynamics. – *Nature* 396(6706): 41–49.
- Hanski, I. e Gilpin, M. 1997. *Metapopulation Biology: Ecology, Genetics, and Evolution*. – Academic Press.
- Hanski, I. e Ovaskainen, O. 2000. The metapopulation capacity of a fragmented landscape. – *Nature* 404(6779): 755–758.
- Hilborn, R. e Mangel, M. 1997. *The Ecological Detective: Confronting Models with Data (MPB-28)*. – Monographs in Population Biology. Princeton University Press.
- Keller, E. 2003. *Making Sense of Life*. – Harvard University Press.
- Kingsland, S. 1982. The refractory model: The logistic curve and the history of population ecology. – *Quarterly Review of Biology* pp. 29–52.
- Kingsland, S. 1985. *Modeling Nature: episodes in the history of population ecology*. – Science and Its Conceptual Foundations S. University of Chicago Press.

- Lande, R. 1987. Extinction thresholds in demographic models of territorial populations.. – *American Naturalist* 130(4): 624–635.
- Lande, R., Engen, S. e Sæther, B. 2003. *Stochastic Population Dynamics in Ecology and Conservation*. – Oxford series in ecology and evolution. Oxford University Press.
- Laplace, P. 1902. *A Philosophical Essay on Probabilities*. – Translated from the sixth French edition by Truscott, F.W. and Emory, F.L. John Wiley & Sons, NY.
- Levins, R. 1969. Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control. – *Bulletin of Entomological Society of America* 15: 237–240.
- Lorscheid, I., Heine, B.-O. e Meyer, M. 2012. Opening the 'black box' of simulations: increased transparency and effective communication through the systematic design of experiments. – *Computational and Mathematical Organization Theory* 18(1): 22–62.
- May, R. e McLean, A. 2007. *Theoretical Ecology: Principles and Applications*. – OUP Oxford.
- Mayr, E. 1996. The autonomy of biology: The position of biology among the sciences. – *Quarterly Review of Biology* 71(1): 97–106.
- McIntosh, R. 1985. *The Background of Ecology: Concept and Theory*. – Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press.
- Okubo, A. e Levin, S. 1980. *Diffusion and Ecological Problems: Modern Perspectives*. – Interdisciplinary Applied Mathematics. Springer New York.
- Okubo, A. e Levin, S. 2001. *Diffusion and Ecological Problems: Modern Perspectives*. – Interdisciplinary Applied Mathematics. Springer.
- Ovaskainen, O. 2008. Analytical and numerical tools for diffusion-based movement models. – *Theoretical Population Biology* 73(2): 198–211.
- Ovaskainen, O. e Meerson, B. 2010. Stochastic models of population extinction. – *Trends in Ecology and Evolution* 25(11): 643–652.
- Pearl, R. e Reed, L. J. 1920. On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and its mathematical representation. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 6(6): 275.

- Peck, S. 2004. Simulation as experiment: A philosophical reassessment for biological modeling. – *Trends in Ecology and Evolution* 19(10): 530–534.
- 2008. The hermeneutics of ecological simulation. – *Biology and Philosophy* 23(3): 383–402.
- Renshaw, E. 1993. *Modelling Biological Populations in Space and Time*. – Cambridge Studies in Mathematical Biology. Cambridge University Press.
- Salmon, W. 1989. *Four Decades of Scientific Explanation*. – University of Pittsburgh Press.
- Salsburg, D. 2001. *The Lady Tasting Tea: How Statistics Revolutionized Science in the Twentieth Century*. – Henry Holt and Company.
- Simberloff, D. 1983. Competition theory, hypothesis-testing, and other community ecological buzzwords. – *American Naturalist* pp. 626–635.
- 2004. Community ecology: is it time to move on?. – *The American Naturalist* 163(6): 787–799.
- Skellam, J. 1951. Random dispersal in theoretical populations.. – *Biometrika* 38(1-2): 196–218.
- Taper, M. e Lele, S. 2004. *The Nature of Scientific Evidence: Statistical, Philosophical, and Empirical Considerations*. – University of Chicago Press.
- Taylor, P. 2005. *Unruly Complexity: Ecology, Interpretation, Engagement*. – University of Chicago Press.
- Turchin, P. 1998. *Quantitative Analysis of Movement: Measuring and Modeling Population Redistribution in Animals and Plants*. – Sinauer Associates, Incorporated.
- Turchin, P. 2001. Does population ecology have general laws?. – *Oikos* 94(1): 17–26.
- Turchin, P. 2003. *Complex Population Dynamics: A Theoretical/empirical Synthesis*. – Monographs in population biology. Princeton University Press.
- Underwood, A. 1997. *Experiments in Ecology: Their Logical Design and Interpretation Using Analysis of Variance*. – Cambridge University Press.
- Wallace, A. 1880. *Island Life: Or, the Phenomena and Causes of Insular Faunas and Floras, Including a Revision and Attempted Solution of the Problem of Geological Climates*. – Great minds series. University of Chicago Press.

Winsberg, E. 2003. Simulated Experiments: Methodology for a Virtual World. – *Philosophy of Science* 70(1): 105–125.

— 2006. Models of success versus the success of models: Reliability without truth. – *Synthese* 152(1): 1–19.

With, K. e King, A. 1999. Extinction thresholds for species in fractal landscapes. – *Conservation Biology* 13(2): 314–326.

Zar, J. 2006. *Introduction to Biostatistics*. – Prentice-Hall, Inc.



## **Capítulo 4**

**Síntese geral: o pluralismo epistemológico e as redes  
complexas de conhecimento**

Grandes controvérsias epistemológicas constituem o cerne dos debates e discussões na filosofia das ciências há séculos (*e.g.* Godfrey-Smith, 2003; Salsburg, 2001; Cooper, 2003). O que procurei mostrar nos capítulos anteriores foi que, algumas destas controvérsias foram debatidas em tom hostil, resultando em disputas calorosas, diversas delas mal fundamentadas e gerando uma grande confusão intelectual entre os cientistas e filósofos. A falta de uma fundamentação argumentativa consistente dos envolvidos em muitas dessas disputas pode promover a disseminação de concepções radicais e no mínimo equivocadas do processo científico. De certa forma, foi isso que observamos quando restringimos a problemática ao âmbito da ecologia (*cf.* Peters, 1976; Murray Jr., 2001). Depois de tudo que fora discutido nesta tese, faz-se necessário apresentar uma síntese que explicita minha proposta pluralista e que deixe claro como vejo a ciência epistemologicamente.

Neste último capítulo central, os principais tópicos discutidos neste manuscrito serão resumidos em princípios gerais da minha proposta. A partir desses princípios, expressarei meu ponto de vista sobre o que considero ser a atividade científica para, assim, concluir minha tese. Para conduzir esta empreitada, evocarei a noção de *caixa-preta epistemológica*<sup>1</sup>, o que me obriga a esclarecer minimamente este termo. A noção de *caixa-preta epistemológica* deriva da constatação prévia (e estabelecida nos capítulos anteriores) de que a epistemologia é movida por intensas e intermináveis controvérsias e que, portanto, filósofos (e cientistas) ainda têm dificuldades em definir com clareza o que é a racionalidade científica<sup>2</sup>. Porém, grande parte dos epistemólogos e dos próprios cientistas naturais reconhecem que a racionalidade é um componente essencial da ciência (*cf.* Feyerabend, 1993, para uma visão que desvaloriza a ênfase racional), como vem sendo proposto há séculos (Gewandsznajder, 1989; Godfrey-Smith, 2003). Uma caixa-preta pode ser definida como “*um dispositivo ou sistema que, por conveniência, é descrito somente em termos de suas entradas e saídas*” (Winner, 1993, p. 365). Filosoficamente, esta ideia passou a ser usada para explicar como a ciência avança quando suas caixas-pretas são abertas e o seu funcionamento interior é investigado, tornando estas caixas translúcidas (Gewandsznajder, 1989). No

---

<sup>1</sup>Até onde pude checar (devo admitir que não foi uma procura intensa), não encontrei ninguém que tenha proposto exatamente este termo, embora a noção de caixa preta para explicar o raciocínio humano ou um conhecimento científico já seja usada há muito tempo pelos construtivistas sociais (*cf.* Winner, 1993, para uma análise crítica a esta escola de pensamento) e pelos adeptos do realismo científico como Mario Bunge (Gewandsznajder, 1989, p. 89–90). Noto que a prioridade na cunhagem deste termo não é o aspecto mais importante em meu ponto de vista e a noção de caixa preta epistemológica foi usada como meio de sintetizar um importante componente da exposição que farei ao longo deste capítulo.

<sup>2</sup>Tomando a liberdade de fazer uma analogia, a epistemologia é a arte de escancarar as limitações racionais do ser humano; a arte de mostrar que somos incapazes de prover uma solução racional que seja única e perfeita para problemas e questões tão básicos e fundamentais, como definir ou explicar o que é *ciência*.



entanto, esta é uma explicação filosófica que os cientistas em geral não precisaram (ou pelo menos não se preocuparam em) estar conscientes para realizarem suas atividades. Portanto, considero que o termo caixa preta epistemológica se encaixa muito bem para descrever o que ocorre no processo científico. Resumidamente, estou considerando que a ciência pode ser praticada e novos conhecimentos podem ser adquiridos e disseminados, sem que o pesquisador necessariamente adentre à epistemologia ou esteja ciente dos seus problemas – parece-me que isso ocorre (e ocorreu) com muitos biólogos e ecólogos<sup>3</sup>. Entretanto, considerando minha experiência pessoal e toda a discussão apresentada nesta tese, estou assumindo que conhecer a epistemologia (a despeito de toda confusão existente neste campo da filosofia) pode tornar mais claro o raciocínio de um cientista, permitindo-o compreender, com maior precisão, tanto o domínio de aplicação de suas teorias, quanto os limites racionais das conclusões que ele pode chegar em suas pesquisas.

Dado este esclarecimento sobre o termo caixa preta epistemológica, voltarei-me ao aspecto formal deste capítulo, que é sintetizar minha visão geral sobre o que é a ciência, com base na análise feita nos capítulos anteriores. Basicamente, abrirei a caixa preta epistemológica na intenção de descrever o que eu vejo dentro dela. Isso possibilitou-me (re)definir o que seriam os programas científicos dos ecólogos em geral, para assim descrever o programa de pesquisa em ecologia que considero satisfatório para minhas necessidades intelectuais – e acredito que para a de muitos outros cientistas. Definido o conceito de programa de pesquisa, partirei para uma perspectiva mais global que, em linhas gerais, leva em conta o aspecto social da ciência e as interações entre os cientistas ou entre culturas epistemológicas distintas (*sensu* Keller, 2003) que se formam em uma rede integrada de conhecimento. Destacarei algumas características interessantes que resultam desta concepção de ciência como uma rede de conhecimento complexa e extremamente dinâmica (*e.g.* geralmente acontecem reajustes nos programas de pesquisa dos cientistas que compõem esta rede). Como último esclarecimento prévio, devo ressaltar que a síntese que proporei a seguir tem dupla interpretação. Ao mesmo tempo que pode ser vista como uma conclusão pessoal da reflexão apresentada nesta tese, também pode ser interpretada como uma conjectura, uma hipótese (ainda não *testada*) sobre *o que é* a ciência, seu funcionamento e o conhecimento dela proveniente. Portanto, em nenhum momento alego que meu ponto de vista é o mais correto ou proponho a primazia de minha concepção. Afinal, eu estaria contradizendo gravemente minha tese pluralista caso

---

<sup>3</sup>Comentei, logo no começo desta tese, que são poucos os cientistas que dedicam uma parte de seu tempo a conhecer, com um mínimo de detalhe, o que os filósofos vem dizendo sobre a ciência.

fizesse afirmações deste tipo.

## 4.1 Princípios gerais e ensinamentos prévios

Para dar mais clareza à minha proposta de ciência epistemologicamente pluralista, algumas considerações iniciais, as quais chamarei de princípios gerais, deverão ser assumidas. Diante do que já apresentei até aqui, creio que o leitor não terá dificuldade ou relutância em aceitá-las. Este conjunto inicial de princípios gerais me levarão a uma proposição inicial que me permitirão introduzir mais concretamente o conceito de culturas epistemológicas e pluralismo científico. A este conjunto definido pelos princípios gerais somados à proposição inicial, juntarei uma série de outros ensinamentos adquiridos dos ensaios apresentados nos capítulos anteriores. Minha intenção em apresentar este conjunto inicial de premissas é que será com ele em mente que abrirei a caixa preta epistemológica para descrever, na seção seguinte, o que eu observo em seu interior<sup>4</sup>. Sendo assim, enuncio abaixo cinco princípios gerais:

1. A ciência é feita por seres humanos.
2. O conhecimento humano sobre o universo é limitado (*i.e.* não somos demônios laplacianos).
3. O ser humano frequentemente tenta descrever e dar sentido aos fenômenos e padrões que encontra ao observar o mundo ao seu redor. Como consequência desta tentativa, uma diversa gama de problemas é gerada, tal que o sucesso nesta empreitada de conhecimento só ocorrerá se o indivíduo puder solucionar estes problemas, ou pelo menos uma parte deles. Especificamente, podemos assumir que um *cientista natural* é um indivíduo que, por princípio, busca um entendimento *racional* e baseado em evidência empírica para os padrões da natureza e para os possíveis processos que os geram.
4. Filósofos tentaram explicar esta racionalidade sem chegarem a uma conclusão definitiva no assunto – tanto os raciocínios elementares, dedutivo e indutivo, quanto as alternativas a eles apresentadas possuem limitações que impedem o cientistas de proferir verdades universais atemporais. Portanto, a racionalidade não garante a certeza sobre a validade de uma ou outra episteme na pro-

---

<sup>4</sup>De certa forma, podemos dizer que foi exatamente isso que aqueles que se dedicaram à epistemologia fizeram ao tentar decifrar o pensamento científico. Neste sentido, o que fiz até este exato momento em termos filosóficos foi descrever e discutir o que os filósofos e cientistas mencionados nesta tese viram quando eles abriram esta caixa preta epistemológica. Portanto, posso dizer que será somente a partir de agora que realmente abrirei esta caixa preta.

dução de um conhecimento absolutamente verdadeiro.

5. Cientistas não possuem um problema universal comum (embora diversos problemas específicos sejam comuns a muitos cientistas). Historicamente, as diferentes disciplinas científicas surgiram fundamentadas em solucionar problemas particulares (com maior ou menor grau de especificidade a depender da disciplina)<sup>5</sup>. Esta fragmentação ou polimorfia do conhecimento (ou, usando os termos de Keller, este mosaico de conhecimentos) pode ser interpretada, em última instância, como uma decorrência do princípio geral 2. No entanto, o que quero ressaltar neste princípio geral é a questão da idiosincrasia e da contingência histórica do processo científico (Keller, 2003).

Os cinco princípios gerais acima listados são premissas que sintetizam muito do que venho discutindo ao longo da tese. Se juntarmos a estas premissas os componentes psicológico-cognitivos e pedagógico-formativos envolvidos na ciência, parece-me inevitável que culturas epistemológicas distintas se formem ao longo da história humana. Estes dois aspectos voltarão à tona mais adiante, mas devo notar que não me aprofundarei na discussão psicológico-pedagógica<sup>6</sup>. Concluo, com todas essas considerações iniciais, que a existência de diferentes meios para a resolução de problemas científicos ou de diversos meios de se obter algum conhecimento na ciência é uma propriedade genuína (da própria ciência) e intrínseca da natureza humana do cientista. Por exemplo, se dermos uma atenção especial aos princípios 2, 4 e 5, e juntarmos a ele o aspecto pedagógico (*i.e.* o que sabemos é influenciado, em parte, por como aprendemos; veja capítulo 2), parece-me intuitivo considerar que problemas diferentes possivelmente envolverão métodos diferentes para sua solução. Mais especificamente, espero usar métodos diferentes se minha intenção for estimar a fecundidade de uma espécie de ave – eu poderia usar um método indutivo estatístico para isso, *e.g.* análise de verossimilhança – ou se o objetivo for determinar a probabilidade de extinção desta mesma espécie de ave em uma paisagem fragmentada com uma dada proporção de habitat disponível. Este último caso levanta um outro ponto, um mesmo problema geral também pode ser concebido de diferentes formas específicas e, por isso, requerer diferentes métodos

---

<sup>5</sup>Ao menos este parece o caso da ecologia e suas subdisciplinas.

<sup>6</sup>Como um comentário pessoal, devo notar que o papel da psicologia e da pedagogia no processo científico é um tema muito instigante que certamente abordarei em estudos futuros. Infelizmente, dada minha inexperiência em psicologia e pedagogia, evitei tocar nestes conceitos no começo de minhas reflexões, acreditando que eu não precisaria deles para concluir esta tese. Porém, estes pontos se mostraram fundamentais para mim num momento tardio de meu doutorado. Esta percepção acabou, portanto, se tornando uma conclusão pessoal; a de que é necessário investigar os aspectos psicológicos e pedagógicos da ciência com maior profundidade para que meu argumento se torne mais completo. Portanto, optei por apenas mencioná-los brevemente e não incluí-los na lista de princípios gerais.

para solucionar os problemas e questões específicos que se originam destas diferentes concepções do problema. Em outras palavras, um pesquisador *A* poderia desenvolver uma equação diferencial para descrever a probabilidade de ocorrência da espécie em paisagens contendo uma proporção especificada de habitat disponível. Por outro lado, um pesquisador *B* poderia amostrar uma certa quantidade de paisagens fragmentadas com propriedades iguais às especificadas pelo problema e, a partir destas observações, testar hipóteses sobre uma probabilidade hipotética previamente especificada ou estimar indutivamente qual seria essa probabilidade. Este meu ponto de vista ficará mais evidente na próxima seção, em que abordarei diretamente o pluralismo epistemológico na ecologia.

Devo notar, no entanto, que há uma questão que continua sem uma resposta assertiva ou consensual: é legítimo aceitar a validade de múltiplas culturas epistemológicas estruturando o pensamento científico? Perguntado de outra forma, devemos considerar que, na realidade, sempre haverá apenas uma e somente uma cultura que mais se aproxima de uma verdade absoluta sobre o que é o mundo? Ainda que não possamos considerar nenhuma cultura epistêmica atual como *a verdadeira*, é possível que no futuro seja demonstrada a primazia de uma cultura epistemo-metodológica, capaz de fornecer respostas verdadeiras, únicas e racionalmente inequívocas<sup>7</sup>. O fato é que, atualmente, não há argumento convincente que *confirme* esta hipótese ou que *rejeite* a legitimidade de múltiplas culturas atuarem conjuntamente na construção do conhecimento. Neste sentido, e aqui expresso minha interpretação particular, considero não só plausível como recomendável adotar uma visão pluralista da epistemologia científica, ao menos como uma premissa inicial ou princípio pragmático de trabalho. Se uma resposta definitiva para a questão acima fosse necessária para um cientista exercer sua função, haveria um problema muito sério para a ciência, pois ela paralisaria - afinal, nenhuma cultura epistemológica foi capaz de prover uma resposta assertiva para a ilegitimidade do pluralismo, muito menos para a legitimidade de uma visão monolítica da ciência.

Para ajudar o leitor a entender melhor porque estou manifestando-me favorável a uma concepção epistemologicamente pluralista da atividade científica, pode ser útil mencionar alguns ensinamentos que

---

<sup>7</sup>Uma resposta mais completa para esta pergunta envolveria a entrada em uma questão que evitei abordar nesta tese, o papel da objetividade na ciência. Este tema é complexo e mais recente na literatura filosófica. A meu ver, este é um assunto que aproxima a epistemologia da metafísica e sobre o qual não disponho de conhecimento suficiente para discutir no momento. Assim como com a questão dos aspectos psicológico-pedagógicos, as questões relativas à objetividade na ciência serão deixadas para um outro momento. Creio que esta limitação não comprometa todo o argumento que desenvolvi até aqui baseado no conceito de racionalidade.

obtive dos ensaios apresentados nos capítulos anteriores<sup>8</sup>. Enfatizarei – de modo sucinto para não ser repetitivo demais – os ensinamentos obtidos de alguns autores específicos, contudo recomendo fortemente que o leitor elenque outros nomes ou mesmo outros ensinamentos dos mesmos autores que citarei. Acredito que isso já será suficiente para evidenciar a pluralidade epistemológica da ciência. Seja como for, abaixo encontram-se os ensinamentos que quero destacar.

### ***Ensino 1: Fisher e o indutivismo sofisticado***

Fisher nos ensina que um programa científico pluri-epistêmico é plausível. Como mostrei no capítulo 3, Fisher atuou tanto na parte inferencial quanto na parte conjectural da ciência. Na parte conjectural, foi capaz de formular importantes modelos de dinâmica genética de populações, assim como derivou soluções analíticas para importantes problemas estatísticos. Curiosamente, Fisher usou o raciocínio dedutivo para derivar as soluções de máxima verossimilhança para várias distribuições de densidade de probabilidade, sendo este conceito de verossimilhança um dos seus principais pontos a favor de seu argumento a favor do indutivismo. Na parte inferencial, este matemático foi capaz de desenvolver um raciocínio hipotético-dedutivo para ser aplicado no teste de hipóteses nulas, além de ter mostrado o importante papel da amostragem e do delineamento experimental no processo empírico-observacional. Em suma, no componente inferencial do processo científico, Fisher nos ensina como lidar com o aspecto amostral das observações empíricas e, com seu teste de hipóteses nulas e com o conceito de verossimilhança, demonstra a importância da estatística e seus modelos para a pesquisa em biologia.

### ***Ensino 2: Newton, Laplace e o pensamento nomológico***

Após o século XVII, mas especialmente a partir do século XIX, matemáticos e físicos como Newton e Laplace nos ensinam a relevância do que muito tempo depois foi descrito como um pensamento dedutivo-nomológico por Hempel. Por meio do raciocínio dedutivo em que leis universais estão contidas nas premissas, físicos foram e continuam capazes de elaborar formalismos matemáticos para descrever e explicar o universo, que incluem modelos capazes de prever o estado do sistema em um dado instante do tempo. Um exemplo de que este raciocínio ainda funciona muito bem para os físicos avançarem seu conhecimento sobre o universo é o fato de, recentemente, alguns astrofísicos terem observado ondas gravitacionais decorrentes do choque entre dois buracos

---

<sup>8</sup>Ressalto que estou tentando ao máximo evitar a possível confusão de que estou dizendo que a ciência é epistemologicamente pluralista pura e simplesmente porque é isso que vejo dentro da caixa preta epistemológica.

negros, algo predito por Einstein há mais de 100 anos em sua teoria da relatividade<sup>9</sup>. Em suma, a episteme usada por estes cientistas nos revela o poder do raciocínio dedutivo matemático em predizer padrões gerados a partir de condições iniciais e processos de interesse do pesquisador, a relevância de fazermos predições com base em generalizações ou princípios gerais, assim como o valor de uma heurística que parte do conhecimento mais simples para o mais complexo (devo enfatizar que este raciocínio torna-se hipotético-dedutivo, quando aplicado efetivamente para predizer com precisão padrões a serem observados empiricamente, *i.e.* no mundo *real*).

### **Ensino 3: Pearl, MacArthur e o estudo de sistemas ecológicos dinâmicos**

Pearl foi um grande promotor do estudo de sistemas dinâmicos em ecologia de populações e além de sua grande contribuição com o modelo logístico de crescimento populacional, incentivou o trabalho de grandes pesquisadores como Lotka nesta área. Com isso, Pearl insemou a noção de sistemas dinâmicos no escopo teórico da ecologia e, com esta noção, a abordagem matemática de equações diferenciais tal qual usada pelos físicos (veja o ensino 2). O modo de pensar dos matemáticos e físicos (para simplificar chamarei de sistêmico-nomológico) foi definitivamente assimilado por uma parcela considerável de ecólogos com os estudos de MacArthur na década 1960. Este matemático promoveu a noção de que para entender os padrões da natureza deveríamos reduzi-lá a seus componentes mais basais, buscando as propriedades mínimas que definem esses sistemas e negando as contingências históricas. Com isso, MacArthur procurou remover o *excesso* de complexidade que dificulta o ecólogo de extrair os processos fundamentais que regulam a dinâmica das populações e das comunidades ecológicas. Muitos ecólogos se valeram desta episteme sistêmico-nomológica promovida por Pearl e MacArthur para derivarem teorias fundamentais tanto em ecologia de populações (*e.g.* Hanski, 1994), quanto na ecologia de comunidades (*e.g.* MacArthur e Wilson, 1963; Hubbell, 2001).

---

<sup>9</sup>Esta foi mais uma corroboração necessária para manter a teoria de Einstein válida, ao menos por enquanto. Caso similar já havia ocorrido quando Einstein fez predições sobre a órbita do planeta Mercúrio, algo que fora constatado apenas 14 anos depois, quando as condições ideais para o teste empírico foram satisfeitas. Isto destaca um aspecto importante da ciência: nem sempre as teorias são corroboradas ou rejeitadas imediatamente após serem propostas. Na astrofísica isso é nítido, pois os fenômenos previstos podem durar décadas para que possam ser efetivamente *testados* empiricamente. Enquanto isso, teorias astronômicas não testadas, mas com potencial de serem *verdadeiras*, são mantidas em caráter apenas conjectural e abstrato. Os astrofísicos, notoriamente, possuem uma habilidade de desenovelar muitas de suas teorias sem precisarem de testes empíricos imediatos que refutem ou corroborem as hipóteses intermediárias que são derivadas no processo de teorização. O raciocínio empregado é dedutivo puro, fundamentado em métodos matemáticos de análise de equações, em que predições geram novas hipóteses que levam a novos modelos e, portanto, novas predições, em um ciclo contínuo e ininterrupto.

Entretanto, aprendemos também que esta visão sistêmico-nomológica não teve o mesmo sucesso, comparado com a astrofísica, em predizer os padrões ecológicos observados na natureza. O que aprendo disso é que nestas áreas do conhecimento científico, previsões precisas tal qual às da astrofísica ainda não foram alcançadas. Sistemas conjecturais, ecológicos e astronômicos, possuem características idiossincráticas e são elaborados para resolver problemas particulares dos cientistas que se dedicam a estas duas áreas de conhecimento. O que quero enfatizar é que a alegação de que teorias ecológicas possuem baixo poder preditivo se comparadas com as teorias físicas, não necessariamente implica que o raciocínio sistêmico-nomológico é inútil quando aplicado a sistemas ecológicos<sup>10</sup>. Tampouco implica que as previsões das teorias ecológicas derivadas deste raciocínio não são testáveis ou mesmo que as hipóteses derivadas destas teorias não careçam de testes para serem corroboradas, como alguns ecólogos sugeriram (*e.g* Roughgarden, 1983). Podemos simplesmente considerar que os teóricos da ecologia ainda não foram capazes de *decifrar* uma estrutura mínima adequada para os sistemas ecológicos. Ou, podemos supor que a matemática analítica ainda não foi desenvolvida suficientemente nesta área (*i.e.* os matemáticos ainda não deram atenção o suficiente aos problemas bio-ecológicos, a ponto de elaborarem sistemas equacionais que satisfaçam minimamente as necessidades preditivas de um ecólogo)<sup>11</sup>. Ainda há uma outra possibilidade, não menos importante, que é baixa comunicação existente entre biólogos e físicos. Em geral, biólogos possuem grandes dificuldades em entender a linguagem matemática e evitam considerar a literatura teórica em suas investigações científicas, visto que os artigos nesta área geralmente são inundados de equações diferenciais incompreensíveis para estes biólogos. Portanto, é possível que o ecólogo esteja alheio aos possíveis avanços teóricos na modelagem de seus sistemas ou mesmo que não seja capaz de compreender os avanços<sup>12</sup>. Assim, o maior aprendizado que adquirir em relação à controvérsia discutida acima, é que não devemos tomar conclusões precipitadas sobre a validade científica de alguma epistême, seja rejeitando-a completamente, seja colocando-a num pedestal.

---

<sup>10</sup>Como vimos acima, muito conhecimento foi e continua sendo produzido com o uso deste raciocínio.

<sup>11</sup>Um ponto frequentemente omitido no debate nomológico da ecologia, mas que gera uma compreensão no mínimo deturpada, é que embora os físicos se valham da noção de leis universais, seus modelos efetivamente preditivos são equações bastante complexas. Portanto, os físicos tiveram certamente que lidar com complicações analíticas tão grandes quanto as enfrentadas pelos ecólogos teóricos. As leis gerais da física são apenas modelos mínimos a partir dos quais o pesquisador deriva modelos mais abrangentes e capazes de prever uma amplitude maior de casos. Basta ver que a lei universal gravitacional de Newton vale apenas para dois corpos no universo.

<sup>12</sup>Da mesma forma, físicos desconhecem os detalhes da ecologia e da biologia e muitas vezes concebem os sistemas bio-ecológicos de modo excessivamente simplificado.

**Ensino 4: Popper e alguns conceitos gerais metodológicos**

Popper nos ensina que a ciência é um processo em evolução. Embora sua episteme contenha falhas (já discutidas no capítulo 2), este filósofo me ensinou alguns princípios científicos muito importantes. Dentre eles destaco i) a ênfase dada à falta de garantia do processo de obtenção de conhecimento científico (teorias são conjecturas cuja verdade não pode ser comprovada), ii) a relevância da episteme hipotético-dedutiva para o avanço científico (*i.e.* este processo é composto por uma parte conjectural e outra inferencial que interagem na produção de um conhecimento científico válido), iii) a ciência é uma atividade criativa e iv) qualquer inferência conclusiva sobre a validade de um dado conhecimento deve passar por um processo crítico. A proposta epistêmica de Popper mostrou que a validade de um conhecimento científico não pode ser estabelecida com base em um ou poucos testes de hipóteses. Pode existir um longo debate científico antes que uma nova proposta teórica venha a se consolidar temporariamente em uma dada área do conhecimento. Novas teorias são confrontadas com antigas ou com teorias de outras áreas do conhecimento que intersectam o campo da nova teoria em jogo. A duração dos debates nesta esfera não é predizível, tampouco qual será sua resolução<sup>13</sup>. Apesar disso, os cientistas continuam realizando suas pesquisas particulares, assumindo um dado corpo teórico como válido. Em suma, Popper nos propõe algumas propriedades do formato geral da ciência (*i.e.* conjectura-inferência, criatividade e crítica) dentro do qual, concluo que inúmeros procedimentos podem ser implementados e diversos caminhos podem seguidos. Por fim, noto que, apesar de Popper não parecer favorável ao pluralismo epistemológico, ainda não está claro – para mim e acredito que para muitos outros cientistas – se a visão racionalista deste filósofo fecha totalmente as portas para uma ciência metodologicamente diversa.

**Ensino 5: Lakatos e a noção de programas de pesquisa**

Lakatos nos ensina a noção de programas de pesquisa na ciência. Uma dada comunidade de cientistas, em suas jornadas pelo conhecimento, desenvolvem um programa de pesquisa constituído pelos problemas e questões de interesse e pelas teorias e evidências que esta comunidade se utiliza para chegar às suas conclusões e proposições sobre a natureza. Este filósofo também

---

<sup>13</sup>Devo notar que Popper não aceitava tão bem a influência social sobre o método científico, pois ele acreditava em uma ciência objetiva (ou que tende a uma verdade objetiva) em que o pesquisador avança em seu conhecimento rejeitando as hipóteses *ruins* e mantendo a hipótese com menos evidência a favor de sua rejeição. De certa forma, a perspectiva de Popper (e de muitos que o interpretaram) foi muito focada ou inspirada no caso emblemático da teoria de Einstein sobrepondo a teoria de Newton.



nos ensina que os programas de pesquisa se modificam com o tempo; novos programas surgem e velhos programas degeneram. Entretanto, estes são os ensinamentos gerais que aprendi da proposta de Lakatos. Embora haja similaridades, creio que existam diferenças fundamentais entre a minha concepção de programa de pesquisa e a deste filósofo. Estas diferenças serão detalhadas na próxima seção. No momento a noção de programas de pesquisa dinâmico é o que me interessa.

### **Ensino 6: Keller e as culturas epistemológicas**

Finalmente, devo destacar os ensinamentos providos por Keller e sua noção de culturas epistemológicas. Esta autora não foi discutida com profundidade até o momento, portanto, vale alguns esclarecimentos adicionais sobre sua perspectiva científica. Para isso, abusarei de algumas citações literais extraídas de sua obra *Making sense of life*, em que Keller nos provê um longo argumento a favor do pluralismo epistemológico nas ciências biológicas<sup>14</sup>. Seu argumento pode ser resumido na resposta que a autora deu à seguinte questão: o que conta (ou não conta) como conhecimento científico válido na biologia? Sua resposta foi que não há “bala de prata”; a validade de um conhecimento científico na biologia é contingencial ao momento histórico e às idiosincrasias de diferentes grupos ou culturas epistemológicas que se formam ao longo da evolução da ciência. A autora define culturas epistemológicas como:

*Techniques, instruments, and experimental systems are well known to be extraordinarily variable, but so too are the meanings attributed to so basic a term as “understanding.” Because reference to scientific practices rarely encompasses that variability, and in order to underscore the dependence of explanatory criteria on the epistemic needs of a particular scientific subculture, I invoke the notion of epistemological culture, by which I mean the norms and mores of a particular group of scientists that underlie the particular meanings they give to words like theory, knowledge, explanation, and understanding, and even to the concept of practice itself*

(Keller, 2003, p. 4)

Desta forma, é de se esperar que culturas epistemológicas diferentes provavelmente terão critérios distintos para decidir a validade ou não de um conhecimento, o que, segundo Keller faz da a ciência um mosaico de culturas epistemológicas. Isto fica claro no excerto abaixo:

*The models, metaphors, and machines that have contributed so much to our understanding provide neither unity nor completeness. They work to answer some questions while avoiding (even obscuring) others; they satisfy certain needs while failing to address others; in short, they leave the project of “making sense of life” with an essentially—and perhaps necessarily—mosaic structure.*

(Keller, 2003, p. 2–3)

Keller ambientou sua discussão no contexto mais específico da biologia do desenvolvimento.

---

<sup>14</sup>Creio que este procedimento me ajudará a expor a posição de esta autora no debate epistemológico de forma mais sucinta.

Ela procurou analisar de que forma biólogos de diferentes culturas procuraram responder a questão: *como as entidades vivas são formadas?* Nesta empreitada, ela descreve as principais culturas científicas envolvidas com esta questão do desenvolvimento biológico para mostrar que as respostas disponíveis ao problema variam com o tempo ou mesmo dentro de um momento histórico particular das ciências biológicas. Keller (2003, p. xi), já no prefácio de seu livro, comenta que:

*What makes the problem of development especially compelling, however, ... is both its difficulty and its historical resistance to any generally acceptable explanation in terms of either genetics or physico-chemical mechanisms. To be sure, there has been no shortage of attempts, but while many of these efforts did (or do) find adherents, at least for a time, no one of them has been able to claim lasting acceptance in the scientific community at large.*

Desta forma, ao descrever o que vejo dentro da caixa preta epistemológica, procurarei mostrar *o que vale como conhecimento ecológico* e assim, discutir problemas similares aos de Keller – porém no âmbito da ecologia. Creio que o trecho abaixo sintetiza muito bem o ponto de vista de Keller sobre o que vale como conhecimento científico e é um bom desfecho sobre seus ensinamentos. Ela diz:

*My own experience, as both a scientist and an historian ... persuades me that answers to such questions are not given but contingent; not universal but rather matters of local, and historically specific, disciplinary culture. The communication gap that has persisted through most of this century between experimental and mathematical biologists provides especially conspicuous evidence of such cultural differences ... But once I was alerted to the problem, other variations in epistemological culture became evident as well, and they are both temporal and interdisciplinary. These reflect differences in questions, in available technology, in resources, and in cognitive, practical, and psychological needs. In other words, my interest here is not in what should count as an explanation in science but on what does count. And for this, one must look to the explanatory conventions operative at particular times and in particular areas of scientific research.*

(Keller, 2003, p. x)

A proposta historicista de Keller, apesar de bem convincente em minha perspectiva, ainda deixa várias perguntas para os filósofos, como por exemplo: podemos definir uma cultura epistemológica científica geral, mas composta por muitas subculturas específicas que interagem entre si (*i.e.* ciência como uma rede de culturas epistemológicas)? Ou devemos assumir que a ciência pode ser descrita pela adição de culturas epistemológicas independentes entre si? Regendo essas três questões está uma mais ampla: se a ciência é epistemologicamente pluralista hoje, este é um estado transiente da ciência rumo a uma estabilidade uni-epistêmica, monolítica? Ou podemos assumir que a ciência é uma atividade em plena transformação (evolução) e, que, portanto sempre será composta por uma pluralidade (diversidade) epistêmica enquanto existir algo chamado ciência? Respostas a essas perguntas recaem novamente na questão evitada do objetivismo, o que, em meu ponto de vista, conduz a discussão inevitavelmente para

a metafísica. Este campo da filosofia não pertenceu ao escopo desta tese e em momento nenhum estou desvalorizando-o. Colocando as questões metafísicas e de objetividade de lado por um instante, o que conluo é que o cientista deve tomar um posicionamento inicial frente às questões acima para que ele possa dar início ao seu processo investigativo (conjectural e inferencial) e para que possa conduzir este processo com um mínimo de coerência. Seja qual for a resposta que o leitor tenha para estas perguntas, passarei a conduzir minha argumentação seguindo as respostas que eu dei a essas questões iniciais. Primeiro, considerando tudo que já foi discutido até aqui, estou assumindo a hipótese da transformação por diversificação, sem a necessidade de um equilíbrio estável final a ser alcançado (muito embora ele possa existir; eu apenas não considero essa premissa necessária). Segundo, assumo que a ciência pode ser vista como uma rede de culturas epistemológicas que interagem entre si (umas mais outras menos), o que também depende do momento histórico em que o cientista se encontra.

Alguns leitores poderão não concordar (sequer aceitar momentaneamente) que todos os argumentos apresentados nesta seção (*i.e.* nos princípios gerais e nos ensinamentos) possam ser considerados suficientes para justificar minha tese de que há um pluralismo epistemológico nas ciências naturais. Entretanto, creio ter provido argumentos suficientes que me permitem pelo menos considerar que, na dúvida em relação à validade de um pluralismo epistemológico na ciência, é legítimo explorar esta possibilidade. Vejo que, dentre outras coisas, poderemos avaliar adequadamente as consequências materiais – em termos de perdas e ganhos para a ciência e para a sociedade – em se adotar esta postura. Contudo, esta é apenas minha perspectiva.

## 4.2 Abrindo a caixa preta epistemológica

Após ter apresentado os conhecimentos prévios que disponho, resta-me abrir a caixa preta epistemológica (CPE) e revelar seu conteúdo geral. O que farei agora é abrir a CPE que há dentro de minha mente, assumindo que o padrão geral que observo é comum ao cientista natural, porém este padrão é idiossincrático<sup>15</sup> no detalhe. O padrão geral que observo ao abrir a CPE está representado na fig. 4.1. Em linhas

---

<sup>15</sup>Um exercício mental ajudará a entender melhor o que quero dizer por padrão geral. Já que estou falando de caixa preta, imagine que um objeto voador possa ser identificado como um avião sempre que observado a uma certa distância do observador. Porém, este observador não é capaz de dizer mais nada além disso. Esta noção é a mesma que quero colocar ao dizer minhas impressões sobre o padrão geral interno da CPE. Contudo, se o observador se aproximar o suficiente do objeto voador, poderá constatar diferenças entre dois aviões observados

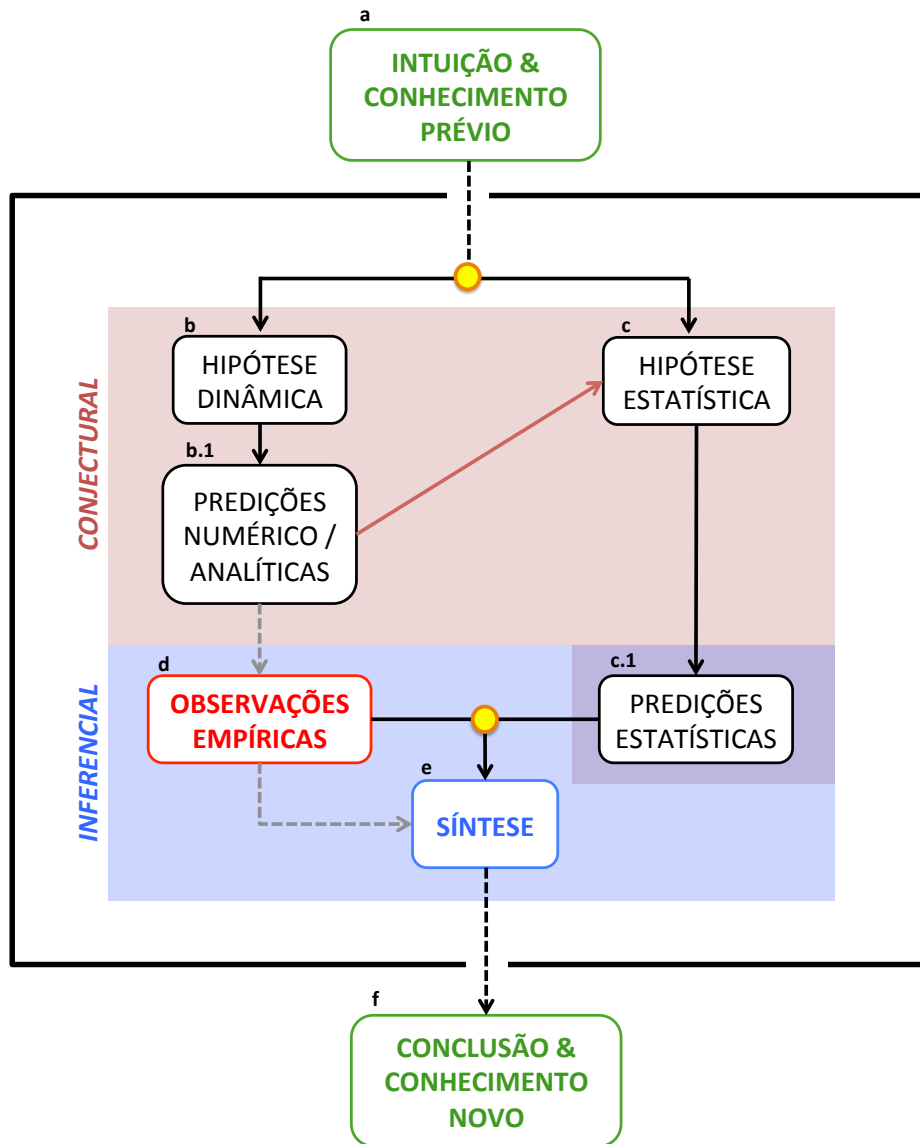


Figura 4.1: **Caixa preta epistemológica (CPE)**. Representação diagramática de como observo a CPE existente na mente de cada cientista. Uma descrição detalhada dos componentes e do funcionamento da CPE consta no texto principal. Resumidamente, o processo racional se inicia com uma intuição ou um conhecimento prévio (teoria, observações) que entra na CPE, se transforma dentro dela e termina provendo uma conclusão e um novo conhecimento (bloco f). A CPE é dividida em um conjunto de componentes conjecturais (fundo rosa; blocos b, b.1, c) e um bloco de componentes que pertencem à parte inferencial (fundo azul; blocos d, e) do processo de obtenção de conhecimento científico. O bloco c.1 (fundo roxo) pertence tanto à parte conjectural quanto à parte inferencial. Diversos caminhos podem ser percorridos dentro da CPE e a intensidade com que um pesquisador percorre cada um desses caminhos define os aspectos epistemológicos gerais de seu programa de pesquisa. As setas b.1  $\rightarrow$  d e d  $\rightarrow$  e são cinzas e tracejadas para destacar que este caminho vem sendo cada vez mais rejeitado na biologia como meio de produzir inferências válidas (veja texto principal).

gerais, o que observo no interior da caixa-preta epistemológica é uma estrutura potencialmente aberta a uma variedade de raciocínios – desde o dedutivo puro até versões sofisticadas do indutivismo ingênuo, passando por adaptações deste raciocínio<sup>16</sup>.

A entrada da CPE recebe um conjunto de informações disponíveis (bloco a, fig. 4.1) que deverão ser processadas dentro desta caixa. Estou considerando que qualquer raciocínio começa a partir de alguma elucubração prévia, seja proveniente de uma intuição, seja proveniente de conhecimentos teóricos ou empíricos anteriores. O cientista contemporâneo nasceu em um mundo que já dispõe de um muita informação e teoria, por isso o ciclo geralmente se inicia com conhecimentos prévios teóricos (Gewandsznajder, 1989)<sup>17</sup>. Com seu conhecimento prévio sobre o mundo, o cientista enxerga problemas e faz questionamentos (esta etapa está representada pelo primeiro círculo amarelo da fig. 4.1). A partir de então, ele poderá seguir uma série de caminhos diferentes dentro da CPE, até chegar em sua saída (bloco f), de onde emanará um novo conhecimento sobre o mundo. Por sua vez, este novo conhecimento passará a ser um conhecimento prévio que entrará de novo na CPE, caso o cientista deseje continuar suas investigações no tema. Um aspecto importante, a despeito do potencial para a diversidade de raciocínios da CPE, é que não vejo um caminho possível para indutivismo ingênuo, já que para isso, seriam as observações empíricas (bloco d) e não o conhecimento prévio que entrariam na caixa. Para ser mais preciso, o raciocínio indutivo ingênuo seria a ligação direta dos blocos d-e-f, tal que o bloco d estaria fora da CPE (assim como o bloco a na fig. 4.1). Portanto, estou assumindo, seguindo Popper, que o processo científico é hipotético e que, exceto em estudos puramente matemáticos, estas hipóteses geradas devem ser de alguma forma testadas. Dada essa ressalva, descreverei abaixo quatro caminhos possíveis na CPE que, a meu ver, definem distintos programas de pesquisa em ecologia.

O primeiro deles (ligação dos blocos b - b.1 - e) é o convencional modo puramente teórico-conjectural de pesquisa em ecologia, preconizado por físicos e matemáticos, mas evitado por grande parte dos ecó-

---

em ocasiões distintas (modelo, companhia, etc). Isso é o mesmo que ocorrerá quando analisarmos a CPE de dois pesquisadores em detalhe.

<sup>16</sup>Ainda tenho reservas quanto ao uso do termo dedutivo para essas adaptações como o hipotético-dedutivismo. Porém esta foi a melhor forma que consegui para expressar os *ajustes* feitos à lógica dedutiva que, à rigor, é uma episteme bastante clara e precisa em sua proposta (veja capítulo 2). No entanto, ainda devo trabalhar um pouco mais para poder proferir algum esclarecimento a esse respeito.

<sup>17</sup>De acordo com Gewandsznajder (1989), quanto mais desenvolvido for o corpo teórico que embasa o conhecimento prévio que o cientista dispõe num dado momento, mais representacional e menos fenomenológico tende a ser o conhecimento gerado ao final de um ciclo na CPE. Portanto, predições mais precisas são esperadas para os fenômenos estudados (veja capítulo 2).

logos. Trata-se da aplicação do raciocínio dedutivo puro para a resolução de problemas envolvendo a dinâmica de sistemas ecológicos. Neste caso, o cientista imagina uma hipótese a respeito da dinâmica do sistema (*e.g.* uma população de uma espécie hipotética), Devo notar que este caminho não está representado em minha CPE, pois estou considerando que ele é percorrido estritamente por matemáticos e físicos que derivam teorias abstratas matemáticas sem se preocuparem com testes empíricos<sup>18</sup>. Estes cientistas têm uma habilidade muito grande de derivar conhecimentos abstratos novos de conhecimentos abstratos anteriores, ou seja, de desenvolverem uma teoria puramente conjectural. A cada volta na CPE estes pesquisadores derivam consequências novas (portanto, novos problemas) de suas teorias e modelos antigos, perfazendo um ciclo que pode se repetir indefinidamente na carreira destes cientistas. Comparo este programa de pesquisa a um grande gerador de ideias e hipóteses sobre o mundo.

O segundo caminho que destaco (ligação dos blocos b - b.1 - d - e), é uma simples modificação do caminho anterior pela adição do bloco d (observações empíricas), um dos principais componentes da CPE de um ecólogo. Com esta adição, as previsões geradas em b.1 são confrontadas com dados secundários da literatura (muitas vezes sem levar em conta o delineamento experimental dos estudos empíricos provedores dos dados) ou mesmo com observações pontuais sem réplicas amostrais feitas pelo pesquisador e sua equipe<sup>19</sup>. Parece-me que este caminho vem sendo cada vez mais rejeitado na biologia como meio de produzir inferências válidas. Atualmente, a maioria dos ecólogos necessita de um método estatístico de inferência para justificar suas conclusões o que não ocorre com aqueles que seguem este segundo caminho epistêmico.

Um estudo clássico que representa esta cultura epistêmica é o de Skellam (1951). Em linhas gerais, este matemático estava interessado em estudar a dispersão dos organismos e seus efeitos na distribuição espacial de suas populações, um problema que na época de Skellam havia sido negligenciado na teoria da ecologia de populações. Com este problema (bloco a), Skellam derivou uma série de hipóteses (bloco b) assumindo que a movimentação dos indivíduos se dava por caminhada aleatória, o que em espaço e tempo contínuos equivale à *lei* da difusão. Com isso, Skellam usa o modelo de reação-difusão para

---

<sup>18</sup>É possível que haja ecólogos que se dediquem única e exclusivamente ao desenvolvimento matemático da teoria (esta é uma limitação de meu conhecimento, pois desconheço algum ecólogo com este perfil). O que me pergunto é o quanto esses ecólogos não se transformaram em matemáticos interessados em problemas ecológicos. A princípio, essa é uma discussão secundária, de demarcação das diferentes disciplinas científicas. Portanto, minha decisão de não colocar a seta  $b.1 \rightarrow e$  foi puramente arbitrária.

<sup>19</sup>Este é um caso típico que observamos na astronomia, em que os testes das teorias são feitas geralmente observando-se a ocorrência de um fenômeno particular esperado para acontecer num dado momento do tempo do universo. Porém na biologia e na ecologia

derivar uma série de predições analíticas sobre a distribuição espaço-temporal da densidade populacional de uma espécie (bloco b.1). Por exemplo, uma das predições de Skellam foi para a velocidade de invasão de uma população em uma dada região inóspita (seção 3.2.1). Para validar sua teoria sobre os padrões de distribuição espaço-temporal de populações, este matemático usou uma série de dados de censo do rato-almiscarado (bloco d), um roedor exótico na Europa. Com esses dados secundários, Skellam mostrou que as observações da expansão de uma população introduzida desta espécie estava de acordo com as predições de suas hipóteses (bloco e; veja em seu artigo detalhes de como ele analisou graficamente esses dados, sem qualquer recurso estatístico). Skellam realizou esse mesmo caminho 2 para analisar uma série de outras predições de sua hipótese sobre o modelo de reação-difusão como lei geral que regula a distribuição das populações em uma região.

O terceiro caminho que apresento (ligação dos blocos c - c.1/d - e) é, a meu ver, o mais tradicional entre os ecólogos, dada a forte influência empiricista destes cientistas. Com base em seu conhecimento prévio, que pode incluir noções das teorias produzidas pelos cientistas que seguem o caminho 2, o pesquisador deriva uma hipótese estatística para explicar a variabilidade de uma variável de interesse em sua pesquisa. Com esta hipótese em mente, o cientista realiza dois procedimentos para dar continuidade à sua pesquisa. Um deles é definir o melhor delineamento experimental para coletar seus dados de interesse. O outro é derivar uma predição estatística (bloco c.1) que se adéque ao delineamento amostral elaborado anteriormente. Finalmente o investigador coleta seus dados (bloco d) e confronta-os com suas predições (caso típico do teste de hipótese nula fisheriano, por exemplo). Este procedimento analítico está representado pelo segundo círculo amarelo na fig. 4.1. Da análise segue a síntese do conhecimento, em que o cientista compara seus resultados com outros disponíveis na literatura, decide se suas hipóteses nulas foram ou não rejeitadas e finalmente chega a suas conclusões, adquirindo assim um novo conhecimento sobre o sistema estudado. Com isso, fecha-se o ciclo do caminho 3. Devo notar que uma outra possibilidade epistêmica derivada do caminho 3 é aquela que se vale de métodos indutivos sofisticados, tipicamente usados em estudos cujo objetivo é estimar parâmetros de distribuições probabilísticas que definem os dados, como já sugerido por Fisher (*e.g.* estimação de parâmetros populacionais; *c.f.* Royle e Dorazio, 2008, mas também a seção 3.1). Nestes casos, o pesquisador formula um conjunto de hipóteses que são convertidas em modelos estatísticos, os quais são confrontados com os dados. Neste processo, obtém-se os valores de verossimilhança de cada modelo (hipótese) que, neste caso, são as predições estatísticas do bloco c.1. Deste confronto das hipóteses com os dados, segue-se a análise dos resultados (*e.g.* por seleção de modelos com base em critérios da teoria da informação Burnham e Anderson, 2002

ou por métodos de inferência bayesianos (King et al., 2009)), uma posterior síntese e a saída da CPE com uma conclusão e um novo conhecimento<sup>20</sup>.

Esta cultura epistêmica que valoriza o caminho 3 da CPE pode ser representada pelos programas de Peters, Simberloff e parcela considerável das gerações de ecólogos que os sucederam. Para visualizar melhor o caminho 3, tomarei como exemplo a proposta de Simberloff, pela qual o ecólogo obtém conhecimento da natureza analisando se suas observações empíricas (*i.e.* um conjunto de dados  $C$  que descreve alguma variável de interesse  $V$ ) poderiam ou não ser obtidas de uma distribuição probabilística “nula” (*i.e.* uma distribuição que descreve a variação de  $V$  em um mundo em que não há efeito da variável preditora investigada no estudo). Em um de seus estudos, Simberloff (1970) reanalisa o primeiro problema ecológico para o qual a abordagem de modelos nulos foi usada, a análise da relação espécie/gênero ( $E/G$ ; Gotelli e Graves, 1996). Aqui ficará claro o raciocínio usado por Simberloff em sua crítica posterior à escola de pensamento hutchinsoniana, que preconizava a competição interespecífica como o principal processo estruturador de comunidades ecológicas. A relação  $E/G$  foi sugerida como uma medida de intensidade competitiva, assumindo-se a premissa darwinista que espécies do mesmo gênero são mais similares e portanto sujeitas a uma luta mais severa pela sobrevivência (Gotelli e Graves, 1996). O problema fundamental que estava por trás da relação  $E/G$  é que estudos empíricos de Elton na década de 1940 mostravam que havia uma dependência entre a escala espacial e o valor médio de  $E/G$  (*i.e.* em escalas locais a média  $E/G \rightarrow 1$ , enquanto que em escala regional esta razão aumentava consideravelmente, *i.e.*,  $E/G > 4$  em muitos casos analisados; Gotelli e Graves, 1996). Elton atribuiu esta diferença à competição inter-específica, que seria forte localmente fazendo que apenas em uma escala regional fossem observados altos valores de  $E/G$  médio.

Tendo a proposta de Elton como conhecimento prévio (bloco a), Simberloff (1970) analisou o problema da relação  $E/G$  para a fauna e flora de centenas de ilhas do planeta, realizando um procedimento de simulação por reamostragem denominado de rarefação (Manly, 2006). Por este procedimento, ele reamostrou computacionalmente seu conjunto de dados, *i.e.*, para uma dada ilha, ele sorteou ao acaso 100 espécies do *pool* de espécies da ilha, calculou o valor de  $E/G$  deste sorteio, repetiu esse procedimento inúmeras vezes, calculou a média de  $E/G$  para esta ilha e repetiu todo esse procedimento para cada uma das 180 ilhas de seu estudo. Com isso, Simberloff usou uma hipótese estatística nula (assumida como uma distribuição probabilística uniforme) para o sorteio dos dados de cada ilha, entrando assim no bloco

---

<sup>20</sup>Veja que este procedimento já fora explicado na seção 3.1.



c. Com esta hipótese ele derivou uma distribuição probabilística da variável  $E/G$ , entrando no bloco c.1, predições estatísticas. Com esta predição ele pode testar sua hipótese sobre o efeito amostral (e não da competição) na razão  $E/G$ , comparando os valores reais de  $E/G$  em seu conjunto de dados (bloco d) com as predições de sua distribuição nula. Simberloff mostrou que para mais de 70% das ilhas amostradas os valores de  $E/G$  foram maiores do que o esperado pelo teste estatístico, contrariando assim a teoria que advogava a favor da competição como processo causador de valores baixos de  $E/G$  em escala local. Este novo conhecimento gerado por Simberloff motivou uma série de outros estudos que usaram esta sua linha de pesquisa para resolver outros problemas ecológicos (Gotelli e Graves, 1996)<sup>21</sup>. Devo notar que, com este caso de Simberloff, estou apenas dando um exemplo entre vários que poderiam instanciar o valor do caminho 3 para o avanço do conhecimento teórico-empírico em ecologia.

Por fim, destaco o quarto caminho (ligação dos blocos b - b.1. - c - c.1/d - e), que considero mais completo em termos conjecturais e inferenciais, e o qual mais me identifico como ecólogo. Idealmente, este programa de pesquisa seria realizado seguindo-se estritamente o caminho sugerido acima (por isso a seta vermelha ligando predições numérico-analíticas a hipótese estatística, indicando que esta ligação é ideal). Contudo, o que observamos na prática é que este programa é dividido em duas voltas na CPE. Primeiro, o cientista realiza o caminho 1, obtém um conhecimento novo que automaticamente se converte em conhecimento prévio e entra novamente na CPE. Nesta segunda fase (geralmente realizada em um novo estudo), ao entrar de novo na CPE, o cientista segue seu raciocínio caminhando direto para o bloco c (elaborando uma hipótese estatística para sua predição obtida na primeira fase) e segue o resto do caminho *ideal* (*i.e.* percorrendo o caminho 3; ligando os blocos c - c.1/d - e)<sup>22</sup>. Com suas novas conclusões, o cientista pode voltar à caixa epistemológica e realizar mais uma vez o caminho 4, ou mesmo pode realizar outras vezes o caminho 3, testando outras hipóteses estatísticas que possam ser derivadas de suas predições numérico-analíticas iniciais antes de voltar a realizar o caminho 1 novamente.

Recentemente, o estudo de Giometto et al. (2014) demonstrou de maneira muito elegante, o *poder*

---

<sup>21</sup>No entanto, vale lembrar que sua teoria e seu programa de pesquisa foram alvos de duras críticas no começo da década de 1980, promovendo um dos grandes debates controversos da ecologia; um debate mencionado recorrentemente nesta tese.

<sup>22</sup>Devo destacar que foi por uma simples questão de decidir um início para minha explicação que considerei a ordem dos caminhos percorridos nas duas fases partindo do caminho 1 para o caminho 3 para perfazer o caminho 4. Entretanto, é plenamente possível realizar o caminho oposto para se chegar no caminho 4, ou seja, realizar primeiro o caminho 3 e depois o 1. Basicamente, é esta variação do caminho 4 que caracteriza o programa de pesquisa de Grimm e Railsback, denominado por eles mesmos de *ecologia baseada no indivíduo* e no qual adotam sua conhecida episteme de modelagem orientada a padrão (POM; *cf.* Grimm, 1999; Grimm e Railsback, 2005, 2012).

de um programa de pesquisa calcado no caminho 4 da CPE. Estes autores foram capazes de testar as predições analíticas de uma versão estocástica do modelo de reação-difusão e mostraram, com evidências experimentais muito contundentes, que a teoria de Skellam (ou Fisher-Kolmogorov) não poderia ser rejeitada quando as condições adequadas para seu teste são satisfeitas. Basicamente, Giometto e seus colaboradores realizaram o caminho 1 para derivar a hipótese de estudo (o modelo de reação-difusão estocástico) e suas predições analíticas. Em seguida, esses autores entraram novamente na CPE e seguiram pelo caminho 3 para testarem estatisticamente suas hipóteses sobre a expansão da frente de difusão da espécie estudada (o ciliado *Tetrahymena* sp.) e chegaram à conclusão que ela se comporta como esperado pela teoria. Até onde meu conhecimento alcança, esta foi a primeira vez que a *validade* de uma *lei geral* da ecologia de populações foi efetivamente demonstrada. Este estudo, a meu ver, pode ser considerado um marco para a teoria ecológica e uma grande demonstração de que as teorias ecológicas possuem diversos níveis de generalidade e que algumas dessas teorias podem sim ter estatuto de lei geral (El-Hani, 2006).

Concluo esta seção dizendo que o conteúdo da CPE é abrangente, no sentido que pode ser aplicado, a princípio, a qualquer *linhagem* de cientista natural (de físicos a biólogos). Entretanto, reafirmo que minha ênfase foi em descrever este programa na perspectiva de um ecólogo, ressaltando as partes que particularmente me interessam mais ou detalhando os caminhos a serem seguidos – e que considero necessários – para satisfazer minhas necessidades intelectuais. Outro aspecto fundamental do funcionamento da CPE é que algumas interações entre raciocínios elementares são possíveis e, quando ocorrem, resultam em *lógicas* consideradas coerentes para atender às demandas e pretensões teórico-empíricas de um dado cientista em particular ou de comunidades (ou culturas) científicas, em geral (esta é a ideia do raciocínio hipotético-dedutivo, por exemplo). Portanto, fica claro em meu ponto de vista que existe um pluralismo metodológico na ciência, o que mostrei descrevendo os raciocínios usados por cientistas pertencentes a algumas das diferentes culturas epistemológicas observadas na ecologia (*i.e.* como ecólogos de diferentes culturas caminham pela caixa preta epistemológica).

### 4.3 Programas de pesquisa adaptativos e alguns aspectos sociológicos da ciência

Os quatro caminhos que usei para descrever a pluralidade do raciocínio científico na ecologia apenas mostram aspectos gerais da prática científica de um ecólogo. Devo enfatizar que, se analisarmos em detalhe cada passo da caminhada epistemológica, muito provavelmente identificaremos inúmeras idiosincrasias nos programas científicos de dois cientistas, mesmo entre aqueles que seguem uma mesma cultura epistêmica geral (*i.e.* priorizam um mesmo caminho geral em suas CPEs). Nesta seção, deixarei mais clara minha definição do conceito de programa de pesquisa, trazendo à tona a noção de sistema adaptativo e a importância de entendermos o efeito de interações colaborativas entre cientistas no progresso da ciência em geral e na transformação dos programas de pesquisa individuais destes cientistas interagentes. Tomei a liberdade de dedicar esta seção a uma discussão mais livre de minhas percepções sobre a ciência em seu âmbito global. Antes de começar minha exposição, uma importante distinção deve ser feita entre minha concepção de programa de pesquisa e aquela de Lakatos. A forma como este filósofo tratou a noção de programa de pesquisa, a meu ver é mais rígida que aquela proponho e se aplica a um grupo ou comunidades de cientistas, enquanto que proponho a definição de um programa de pesquisa com base individual. Lakatos, em linhas bem gerais, tentou *ajustar* o método popperiano para explicar porque todos os cientistas não pensam da mesma forma se sempre há uma hipótese que é, *racionalmente*, a menos *refutada* dentre as disponíveis. Para isso, Lakatos propôs que o programa científico é composto por um núcleo teórico rígido e imutável e um cinturão protetor composto por teorias e hipóteses “auxiliares” (Gewandsznajder, 1989). Entretanto, Lakatos não soube explicar satisfatoriamente como um cientista determina o núcleo de seu programa, tampouco a necessidade de haver algo rígido e imutável num programa de pesquisa científico. Como procurarei mostrar adiante, minha proposta de programa de pesquisa é aberta a contínuas alterações no programa de pesquisa. Considero também que mudanças epistêmicas não necessariamente implicam em uma substituição abrupta de um programa de pesquisa por outro, tampouco na negação completa dos conhecimentos anteriores à mudança.

A primeira noção que quero introduzir é a de que o programa de pesquisa de um cientista pode ser descrito pelo esforço (tempo, energia) que ele dedica, durante sua carreira, a cada uma das vias gerais da CPE. Neste sentido, haverá um gradiente de cientistas, desde aqueles com programas mais restritos, que só admitem uma via epistemológica (*e.g.* cientistas que se valem única e exclusivamente do

caminho 1, 2 ou 3 em toda sua carreira) até aqueles com programas já centrados na via epistemológica 4, que por definição passa por todos os componentes da CPE. Devo notar que esta minha noção de programa de pesquisa ainda se encontra em um nível conceitual-ideológico mais abstrato. Formalizar este conceito em variáveis que podem ser observáveis não é uma tarefa simples e trivial (*i.e.* como medir o quanto um cientista usa de cada via possível de ser percorrida na CPE?). Entretanto, creio ser possível trabalhar neste momento em um nível puramente conjectural. O que quero ressaltar é que um programa de pesquisa pode ser tratado como um sistema adaptativo, cujas adaptações se dão por meio de modificações no modo como um pesquisador interage com sua própria CPE, conforme sua carreira científica progride. Desta forma, a racionalidade dos cientistas é um atributo mutável – que pode variar ao longo de tempo. Mudanças ocorrem quando um cientista deixa de percorrer certas vias da CPE em detrimento de outras ou quando um pesquisador passa simplesmente a incluir mais vias epistemológicas em suas pesquisas. Existem pelo menos duas vias não excludentes que promovem adaptações de raciocínio, portanto modificações no funcionamento da CPE de um cientista. A primeira é interna, decorrente de uma análise auto-crítica do próprio cientista, que o faz enxergar problemas no modo como ele vinha conduzindo suas pesquisas e, assim, passa adotar outros meios racionais para atingir seus objetivos<sup>23</sup>. Já a segunda via se dá por meio das interações que os cientistas fazem entre si e será nesta via que me concentrarei até o fim desta seção.

Simplificadamente, podemos dizer que os cientistas possuem diferentes propensões a realizarem interações com alguém de uma cultura diferente. Estas interações geralmente envolvem mudanças no perfil epistemológico do cientista. Digamos também que cientistas mais propensos a este tipo de interação tenham um perfil mais *mutualista*. Por meio de colaborações (interações *mutualísticas*), os cientistas ampliam seus conhecimentos de uma forma que dificilmente conseguiriam se tivessem que realizar suas pesquisas sozinhos. Nestes casos é provável que o pesquisador tenha que lidar com os aspectos contingentes das culturas epistemológicas daqueles cientistas com quem ele interage. Neste processo interativo, os cientistas podem modificar diretamente ou indiretamente a forma como usam suas CPEs. O primeiro caso ocorre se um dado cientista passar a usar vias que não usava anteriormente, como resultado de sua interação com outro pesquisador. Já o segundo caso ocorre simplesmente se os cientistas interagentes

---

<sup>23</sup>Eu me considero um usuário desta via de adaptação epistemológica. Para não parecer que a questão da racionalidade mutável é uma opinião individual irrelevante, Kingsland (1985), por exemplo, nos dá o exemplo de Thompson, um ecólogo que mudou radicalmente seu programa de pesquisa, quando passou a negar o raciocínio convencional dos físicos e matemáticos em favor de uma visão mais empírica.

passarem a reconhecer o valor de outras vias, apesar de não as utilizarem efetivamente no seu dia a dia. Exemplos deste tipo de interação são inúmeros na ciência. Um deles parece ter sido o que ocorreu com Hanski ao interagir com o matemático Otso Ovaskainen<sup>24</sup>. Com esta interação, além de importantes artigos científicos que fizeram a teoria em ecologia de populações avançar sobremaneira, Hanski também ampliou sua compreensão do caminho 2 da CPE<sup>25</sup>. Analogamente, acredito que o mesmo tenha ocorrido com Ovaskainen que ampliou sua compreensão da via epistemológica 3 e assim ajustou o funcionamento de sua CPE (esta preocupação do matemático pode ser constatada em Patterson et al., 2008).

No entanto, os cientistas não interagem unicamente por meio de interações mutualísticas. Há pesquisadores mais relutantes a interações intepistêmicas e que, além disso, assumem uma postura claramente *etnocêntrica*<sup>26</sup>. Esses cientistas têm um perfil mais *competidor*. Este perfil poder ser facilmente traçado em Peters, Murray ou mesmo Simberloff, os quais parecem ter uma maior predisposição ao conflito<sup>27</sup>. Como deixei evidente ao longo desta tese, a história da ciência é repleta de disputas intelectuais que caracterizam este outro tipo de interação entre cientistas. Um argumento favorável à postura competitiva é que adotando o etnocentrismo, evita-se que teorias e conhecimentos equivocados se disseminem. Por exemplo, ela evita que, atualmente, cientistas usem teorias geocêntricas para fazer previsões astronômicas. Contudo, este argumento é bastante frágil, pois vimos que existe uma grande dificuldade em se estabelecer, racionalmente, o que é verdadeiro e o que é falso (capítulo 2, 3); nenhum raciocínio científico é garantido.

Em conjunto, estas interações entre cientistas deflagram os aspectos sociológicos relacionados ao avanço da ciência. São raros os momentos na história em que alguma teoria ou um paradigma (*sensu* Kuhn), foi completamente rejeitado (*e.g.* o sistema heliocêntrico em detrimento do geocêntrico). Mesmo nesses casos, há um grande lapso temporal entre a proposição de uma nova teoria e o aban-

---

<sup>24</sup>Outras colaborações poderiam ser citadas (*e.g.* a de Hutchinson e MacArthur, a de MacArthur e Wilson

<sup>25</sup>Infelizmente não tenho como afirmar se Hanski passou, efetivamente, a usar mais a via epistemológica 2 em seu dia a dia após sua interação com Ovaskainen ou se apenas aumentou seu leque epistemológico ao ampliar seu conhecimento sobre os métodos matemáticos. Para saber disso, só perguntando a Hanski ou convivendo com ele.

<sup>26</sup>Pesquisadores que procuram invalidar o corpo teórico de cientistas com culturas epistemológicas diferentes da sua.

<sup>27</sup>Não incluí Roughgarden aqui porque, na minha interpretação, esta ecóloga possui uma perspectiva mais moderada em sua argumentação, embora ela pareça pertencer ao grupo de cientistas que se valem de uma abordagem uni-epistêmica – no caso de Roughgarden, pelo uso de um raciocínio que valoriza, majoritariamente, a via epistemológica 2 em suas atividades rotineiras. Portanto, o leitor deve ter claro que estou traçando dois tipos extremos e hipotéticos de perfil (propenso e relutante à interações intepistêmicas) em caráter didático. O que existe no mundo real é um gradiente ou uma mistura mais diversa de perfis.

dono (ou degeneração, como propõe Lakatos) de antigas teorias que se oponham (total ou parcialmente) à nova (Chalmers, 1993; Gewandsznajder, 1989). Portanto, não podemos negar completamente que a validade de qualquer conhecimento passará pelo crivo social para ser rejeitada e que este é um importante termômetro para se definir o *status de rejeição* de uma teoria num dado momento da história. Será desse processo de *apreciação* social que poderemos avaliar o nível de rejeição (ou aceitação para aqueles que não são tão rigorosos com esta parte terminológica) de alguma teoria que qualquer cientista venha a defender<sup>28</sup>. Obviamente, para que este processo transcorra, é necessário que as conclusões de qualquer pesquisa científica se tornem públicas.

Para finalizar minha proposta de programa científico, devo esclarecer um importante ponto que confunde muitas pessoas. Ao ser favorável ao pluralismo epistemológico, não estou afirmando que tudo é possível na ciência. Esta noção anárquica da ciência é atribuída a Feyerabend, talvez o primeiro filósofo a advogar explicitamente a favor de um pluralismo metodológico. Analisando superficialmente, poderíamos dizer que se a ciência é plural e que, por isso, não existe característica metodológica que a distinga de outras atividades que geram conhecimento. Portanto, qualquer método passa a ser válido para Feyerabend. Caberia ao crivo social dar a apreciação sobre a validade das teorias. Porém, não há uma justificativa clara para pensarmos como este filósofo. Meu ponto de vista nesta questão se alinha novamente ao de Keller (2003), que considera a necessidade de haver um denominador comum que “*ligue as aspirações epistemológicas dos biólogos em uma simples identidade disciplinar*”. Este denominador comum são aspectos gerais da atividade científica que são desempenhados por qualquer pesquisador, independente de sua cultura. Circunscrita por esse denominador comum, a atividade científica pode seguir por diversas vias epistêmicas que caracterizam diferentes culturas metodológicas, como procurei mostrar aqui. Entretanto, definir exatamente o que é este denominador talvez seja o grande desafio da epistemologia contemporânea.

---

<sup>28</sup>Embora eu deva enfatizar que, no nível individual, o cientista pode seguir a tendência social ou não em suas atividades. Maxwell, por exemplo, adotou uma abordagem mecanicista newtoniana e que se valia de conceitos como o éter para demonstrar o eletromagnetismo e suas propriedades. Os seguidores de Maxwell insistiram em usar a abordagem newtoniana, mesmo havendo evidências de suas limitações, como demonstrado nos estudos de Lorentz e Hertz (Chalmers, 1993).

## 4.4 Ciência: uma rede complexa de conhecimento formada por cientistas interagentes

Para finalizar este capítulo, quero introduzir a noção de redes complexas para representar o que é a ciência, em meu ponto de vista<sup>29</sup>. Talvez, esta seja a parte mais especulativa deste manuscrito, no entanto, foi uma conclusão que cheguei após a análise da epistemologia que desenvolvi nesta tese. Devo alertar que a proposta que apresentarei é ainda muito superficial e ainda carece de muito investimento intelectual para ser formalizada rigorosamente. Uma rede complexa, em termos bem simplificados, é composta por diversos nós interligados, sendo que as ligações entre os nós denotam a existência de uma interação entre eles. Parece-me que este é exatamente o caso do conhecimento científico, o qual pode ser visto como uma rede complexa composta por cientistas e seus programas de pesquisa (os nós da rede) que interagem entre si não apenas competitivamente em suas disputas teóricas, mas principalmente estabelecendo pesquisas colaborativas. Se tomarmos os casos discutidos na seção anterior, é fácil notar que Hanski e Ovaskainen estabeleceram uma forte conexão colaborativa entre si e que Simberloff e Roughgarden claramente competiram quando um tentou invalidar a proposta do outro. Estes são meros exemplos dentro de uma rede estruturada em milhões de cientistas e suas interações<sup>30</sup>. Creio que ao entendermos melhor a estrutura e a dinâmica dessas redes, obteremos uma compreensão muito mais clara e sensata do que é a ciência e o conhecimento que esta atividade humana provê ao mundo.

Atualmente, concepção de redes complexas tem se disseminado rapidamente em muitos ramos da ciência, desde a física até as ciências sociais, incluindo a ecologia (Melián e Bascompte, 2002; Lewinsohn et al., 2006; Bascompte, 2007; Ings et al., 2009; Dale e Fortin, 2010). O conhecimento gerado

---

<sup>29</sup>El-Hani (2006) sugere um conceito similar, porém em um contexto mais específico relacionado ao problema de generalizações científicas. Apesar disso, sua ideia geral se ajusta muito bem ao que apresentarei nesta seção. El-Hani conclui que “a construção de teorias ecológicas (e, em termos gerais, biológicas) é a maneira de estabelecer [as] propriedades desejáveis das generalizações. Estas não são propriedades que uma proposição pode ter isoladamente, mas apenas como membro de um conjunto integrado de proposições ou uma rede teórica, na qual cada membro ajuda a delimitar o domínio de aplicação de qualquer outro membro. Estes conjuntos integrados de afirmações sobre o mundo são, possivelmente, compreensíveis nos termos das ‘máquinas nomológicas’ de Cartwright (1999), modelos constituídos por vários componentes em interação que, se estiverem de acordo com os aspectos relevantes do mundo empírico, exibirão comportamento similar ao dos sistemas modelados.” (p. 61)

<sup>30</sup>Aqui estou considerando uma rede de conhecimento atual, ou seja, estou levando em conta apenas os cientistas vivos e que estão em condições de interagir agora. Contudo, podemos pensar em uma estrutura de rede que contemple o conhecimento passado, dos cientistas que já faleceram. Lembro o leitor que a proposta de organizar o conhecimento científico em uma rede complexa ainda é incipiente, e aqui apresentada em caráter especulativo-conjectural.

por estudos de redes ecológicas ou sociais complexas pode ajudar bastante os epistemólogos a definirem melhor o que é a racionalidade e como os cientistas usam sua razão no desenvolvimento de suas teorias hipotéticas sobre a natureza. A teoria nesta área do conhecimento dispõem de uma série de métricas que descrevem a estrutura de redes complexas e que, presumo, podem ser usadas para descrever algumas características da rede de conhecimento que estou propondo. Por exemplo, pensando apenas na parte colaborativa da rede de conhecimento, esta rede possivelmente será composta por mais de um sub-grafo (*i.e.* conjunto de nós mais conectados entre si que com outros nós externos ao conjunto). Assim, cientistas pertencentes a um mesmo subgrafo estão mais conectados entre si, ou seja, fazem mais colaborações e provavelmente compartilham CPEs que têm um funcionamento similar. O que quero sugerir com essa ideia é que estes subgrafos talvez nos ajudem a identificar e definir diferentes culturas epistemológicas.

Podemos também analisar se a formação destes subgrafos colaborativos está associada a interações antagonísticas entre cientistas pertencentes a subgrafos diferentes. (*e.g.* pode ser que alguns subgrafos sejam formados por cientistas que compartilham um perfil relutante a interações *conciliadoras* e que, portanto, só interagem com outros cientistas que tenham um perfil epistemológico similar). Isto seria percebido se, ao montarmos uma rede de interações competitivas, observássemos um alto *grau* (*i.e.* uma métrica de rede que mede quantas conexões estão associadas a um dado nó) para cientistas que compõem um dado subgrafo mas um baixo grau para cientistas que compõem um outro subgrafo da rede. Dito em outras palavras, algumas culturas epistemológicas são relutantes em aceitar o pluralismo e poderiam ser identificadas por subgrafos em que seus cientistas essencialmente compartilham os mesmos caminhos epistêmicos e rejeitam epistemes alternativas. Por exemplo, Murray e seus seguidores formariam um subgrafo deste tipo, assim como Peters e seus seguidores. Outros subgrafos seriam formado por cientistas mais colaborativos e que visam ampliar seu conhecimento integrando métodos e epistemes diferentes<sup>31</sup>. Cientistas com este perfil colaborativo parecem ter mais predisposição a aceitarem o pluralismo intepistêmico e provavelmente estes pesquisadores possuem CPEs que se readaptam a taxas mais rápidas que cientistas com um perfil mais competitivo e restrito epistemologicamente. Contudo, estas são apenas suposições conjecturais que ainda precisam ser investigadas com maior profundidade.

Concluo esta seção recomendando fortemente que filósofos e cientistas dedicados a compreender o que é ciência em termos epistemológicos se unam na tentativa de elucidar as vantagens e as limitações

---

<sup>31</sup>Durante este doutorado tive a grande oportunidade de conviver com Carlos J. Melián, quem me convenceu teórica e empiricamente que esta visão mutualística de ciência não só é possível como fortemente recomendável.



do uso do conceito de redes complexas para suas investigações. Diversas são as linhas de pesquisa que podem ser desenvolvidas nesta área, uma vez que a estrutura das redes pode ser descrita de inúmeras formas (Bascompte, 2007). Aqui, descrevi noções muito básicas e superficiais ao conceber redes de competição e de mutualismo entre cientistas, mas outras formas de estruturar e analisar a rede de conhecimento podem e devem ser investigadas. Creio que com uma compreensão mais profunda desta complexa rede de conhecimentos científicos poderemos avaliar melhor se o pluralismo científico realmente é uma noção equivocada (*e.g.* analisando a produtividade, disseminação e consequências sociais das teorias de cientistas que pertencem a diferentes culturas epistemológicas – *i.e.* subgrafos de uma rede de perfis de caixas pretas epistemológicas). Portanto, considero que a adoção do conceito de redes complexas para a resolução dos problemas epistemológicos é bastante promissora.

#### 4.5 Considerações finais

Em vista de tudo que discuti neste capítulo, parece-me mais intuitivo conceber a ciência como resultado de múltiplas culturas epistemológicas, que assumir a busca por uma sedimentação metodológica, transformando a ciência numa atividade monolítica. Considero que o cientista toma uma atitude racional quando leva em conta o debate epistemológico no momento de (re)definir seu programa de pesquisa e, neste aspecto, procurei mostrar que existem inúmeras oportunidades para um debate *amigável*, cabendo a cada cientista identificá-las. Desta forma, sugiro que haja uma redefinição da noção de racionalidade, tal que não tratemos a razão como um atributo rígido capaz de direcionar o caminho da humanidade para a verdade absoluta. Em minha proposta, racional passa a ser estabelecer acordos, investigar potencialidades, buscar melhores soluções para os problemas e, acima de tudo, não estabelecer previamente que alguma visão de mundo é aquela supostamente certa e verdadeira para atacar algum problema ecológico. Em minha perspectiva, fazer ciência é interagir com o conhecimento alheio como meio de transformar o próprio conhecimento. Portanto, convido o leitor a i) abrir sua caixa preta epistemológica, ii) tentar elucidar para si mesmo o modo como seu programa específico de pesquisa *conversa* com esta caixa preta, iii) identificar as portas que podem ser abertas para interações colaborativas com outros pesquisadores e, assim, a iv) ampliar a receptividade de seu programa de pesquisa. Creio que este exercício ajudará qualquer cientista a entender melhor seu ofício.

Por fim, um último comentário é necessário. Uma vez que minhas conclusões ainda são “frescas”,

não sou capaz de identificar, agora, as limitações de minha proposta, mas espero que isso fique evidente com o tempo. Uma rápida análise auto-crítica final me fez enxergar que talvez minha proposta possa ser interpretada analogamente a uma tautologia (portanto, sem conteúdo informativo), pois ela inclui (aceita) todas as epistemes debatidas nesta tese. Para esclarecer definitivamente minha intenção ao discutir este ponto, posso supor que alguém poderia argumentar que estou dizendo que a ciência é realizada de acordo com minha proposta de programa de pesquisa científico simplesmente porque estou dizendo que é assim que vejo o que os cientistas fazem e fizeram historicamente. Isto tem um reflexo contraditório em meu pensamento. Por um lado, fico frustrado pois, se for somente este o conteúdo interpretativo de minha proposta, o leitor possivelmente fez uma leitura equivocada, já que a proposta não é tão simplista quanto esta interpretação sugere. Por outro lado, fico satisfeito se essa interpretação for dada, pois essa foi uma das minhas intenções: mostrar o que penso da ciência, descrevendo linearmente este pensamento extremamente complexo e procurando justificá-lo da maneira mais clara, justa e racional possível. Ao mesmo tempo, esta auto-crítica me fez pensar que talvez uma propriedade do pluralismo epistemológico seja exatamente essa, prover uma explicação tautológica para a racionalidade científica, uma vez que o pensamento pluralista é inclusivo em termos de variabilidade cultural. Além disso, pergunto-me o quanto tautologias são conhecimentos triviais inúteis ou capciosamente reveladores. Talvez a maior parte das tautologias sejam realmente fúteis, porém algumas delas podem ser muito frutíferas se pudermos derivar conhecimentos inesperados desta tautologia. Por exemplo, considerando que a assertiva convencional da teoria darwinista da evolução (*i.e. a sobrevivência do mais adaptado*) pode ser considerada tautológica (Peters, 1976), grande parte dos biólogos se sentiriam ofendidos se dissessem que a teoria evolutiva não progrediu, muito mais se a justificativa dada for por esta teoria ser baseada numa tautologia<sup>32</sup>. Porém, este é um problema a ser melhor explorado futuramente.

## Bibliografia

Bascompte, J. 2007. Networks in ecology. – *Basic and Applied Ecology* 8(6): 485–490.

Burnham, K. e Anderson, D. 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. – Springer New York.

---

<sup>32</sup>Apesar deste enunciado ter sido – e ainda é de certa forma – o *rótulo* do darwinismo, qualquer biólogo atento à sua disciplina sabe reconhecer que a teoria evolutiva de Darwin e Wallace é muito mais que este mero clichê simplista.

- Chalmers, A. F. 1993. *O que é ciência afinal?*. – Editora Brasiliense.
- Cooper, G. 2003. *The Science of the Struggle for Existence: On the Foundations of Ecology*. – Cambridge Studies in Philosophy and Biology. Cambridge University Press.
- Dale, M. e Fortin, M. 2010. From graphs to spatial graphs. – *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 41.
- El-Hani, C. 2006. Generalizações ecológicas. – *Oecologia Braziliensis* 10(1): 17–68.
- Feyerabend, P. 1993. *Against method*. – Verso.
- Gewandsznajder, F. 1989. *O método científico*. – Livraria Pioneira Editora.
- Giometto, A., Rinaldo, A., Carrara, F. e Altermatt, F. 2014. Emerging predictable features of replicated biological invasion fronts. – *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(1): 297–301.
- Godfrey-Smith, P. 2003. *Theory and Reality: An Introduction to the Philosophy of Science*. – Science and Its Conceptual Foundations series. University of Chicago Press.
- Gotelli, N. e Graves, G. 1996. *Null models in ecology*. – Smithsonian Institution Press.
- Grimm, V. 1999. Ten years of individual-based modelling in ecology: What have we learned and what could we learn in the future?. – *Ecological Modelling* 115(2-3): 129–148.
- Grimm, V. e Railsback, S. 2005. *Individual-Based Modeling and Ecology*. – Princeton Paperbacks. Princeton University Press.
- Grimm, V. e Railsback, S. F. 2012. Pattern-oriented modelling: a ‘multi-scope’ for predictive systems ecology. – *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 367(1586): 298–310.
- Hanski, I. 1994. A practical model of metapopulation dynamics. – *Journal of Animal Ecology* 63(1): 151–162.
- Hubbell, S. 2001. *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography (MPB-32)*. – Monographs in Population Biology. Princeton University Press.
- Ings, T. C., Montoya, J. M., Bascompte, J., Blüthgen, N., Brown, L., Dormann, C. F., Edwards, F., Figueroa, D., Jacob, U., Jones, J. I. et al. 2009. Review: Ecological networks—beyond food webs. – *Journal of Animal Ecology* 78(1): 253–269.

- Keller, E. 2003. *Making Sense of Life*. – Harvard University Press.
- King, R., Morgan, B., Gimenez, O. e Brooks, S. 2009. *Bayesian Analysis for Population Ecology*. – Chapman & Hall/CRC Interdisciplinary Statistics. CRC Press.
- Kingsland, S. 1985. *Modeling Nature: episodes in the history of population ecology*. – Science and Its Conceptual Foundations S. University of Chicago Press.
- Lewinsohn, T. M., Inácio Prado, P., Jordano, P., Bascompte, J. e M Olesen, J. 2006. Structure in plant–animal interaction assemblages. – *Oikos* 113(1): 174–184.
- MacArthur, R. H. e Wilson, E. O. 1963. An equilibrium theory of insular zoogeography. – *Evolution* pp. 373–387.
- Manly, B. 2006. *Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology, Third Edition*. – Chapman and Hall texts in statistical science series. Taylor & Francis.
- Melián, C. J. e Bascompte, J. 2002. Complex networks: two ways to be robust?. – *Ecology Letters* 5(6): 705–708.
- Murray Jr., B. 2001. Are ecological and evolutionary theories scientific?. – *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 76(2): 255–289.
- Patterson, T. A., Thomas, L., Wilcox, C., Ovaskainen, O. e Matthiopoulos, J. 2008. State–space models of individual animal movement. – *Trends in ecology & evolution* 23(2): 87–94.
- Peters, R. H. 1976. Tautology in evolution and ecology. – *The American Naturalist* 110(971): 1–12.
- Roughgarden, J. 1983. Competition and theory in community ecology.. – *American Naturalist* 122(5): 583–601.
- Royle, J. e Dorazio, R. 2008. *Hierarchical Modeling and Inference in Ecology: The Analysis of Data from Populations, Metapopulations and Communities*. – Elsevier Science.
- Salsburg, D. 2001. *The Lady Tasting Tea: How Statistics Revolutionized Science in the Twentieth Century*. – Henry Holt and Company.
- Simberloff, D. S. 1970. Taxonomic diversity of island biotas. – *Evolution* pp. 23–47.
- Skellam, J. 1951. Random dispersal in theoretical populations.. – *Biometrika* 38(1-2): 196–218.

Winner, L. 1993. Upon opening the black box and finding it empty: Social constructivism and the philosophy of technology. – *Science, Technology, & Human Values* 18(3): 362–378.



# **Capítulo 5**

## **Conclusão**

Pluralismo é mais um conceito complexo e que vem ganhando força nos debates filosóficos da literatura bio-ecológica das últimas três décadas (*e.g.* Norgaard, 1989; Keller, 2003; Mitchel, 2004). Analisando este assunto no nível amplo das grandes disciplinas científicas, parece-me razoável considerar que fora principalmente a evolução da biologia como ciência que incitou este tipo de discussão. Os biólogos não seguiram à risca o modo de fazer ciência tradicional dos físicos e mesmo assim fizeram a biologia avançar teoricamente. Na ecologia a discussão é um pouco mais problemática que em áreas como a genética ou a bioquímica, por exemplo, em que os avanços teóricos se traduzem em algo que afeta mais diretamente a vida das pessoas (*e.g.* tratamentos para uma doença, controle químico de pragas agrícolas). Os ecólogos, é verdade, ainda carecem de teorias preditivas mais precisas para explicar os fenômenos que estudam (*e.g.* os padrões de distribuição das espécies em diferentes ambientes). Entretanto, isto não é um motivo para dizer que a ecologia não está avançando, mesmo que lentamente, e que este avanço não possa vir a ser mais acelerado no futuro, caso consigamos desenvolver teorias mais precisas.

Esse avanço lento e travancado da ecologia é, em parte, reflexo de controvérsias filosóficas em seus fundamentos debatidas, equivocadamente, em tom de disputa. O que se observou na literatura destinada à discussão teórica da ecologia dos últimos 40 anos foi uma grande confusão mediada por disputas intelectuais calorosas – *e.g.* entre Roughgarden (1983) e Simberloff (1983) ou entre Murray Jr. (2001) e Peters (1976) – que não chegaram a uma resposta consensual para os problemas fundamentais da disciplina. O resultado destas disputas foi uma politomia de programas de pesquisa que passaram a se desenvolver sem muita interação. Portanto, o conhecimento parece ter se fragmentado ao invés de integrado – muito embora tentativas recentes de unificação teórica vem sendo propostas (*e.g.* Vellend, 2010).

Controvérsias epistemológicas, no entanto, são inevitáveis em um mundo sem garantias racionais, em que ainda há muito por ser descoberto. Portanto, parece-me mais sensato admitir nossa ignorância e reconhecer que cientistas pertencentes a culturas diferentes da nossa provavelmente valerão-se de epistemes distintas das nossas pra conceber suas teorias para explicar algum fenômeno. Porém, estas teorias podem ter domínios que se sobrepõem em algum(ns) aspecto(s) e isso abre uma grande oportunidade para colaboração (ao invés de competição) e, portanto, a um sincretismo de culturas científicas. Um conceito que propus aqui, foi o de caixa preta epistemológica, que quando aberta, permite ao cientista compreender o funcionamento de seu raciocínio. Não só isso, este cientista pode se dar conta da variedade de problemas e de vias epistemológicas que a mente humana tem para resolvê-lo e assim derivar



conhecimentos cientificamente válidos. Neste exercício constante com sua caixa preta, o cientista adquire mais consciência de sua atividade e das limitações que seus raciocínios possuem, permitindo a ele definir com clareza seu programa de pesquisa científico.

Outro conceito importante é o de programa de pesquisa. Ao contrário de Lakatos, meu olhar para os programas de pesquisa se deu no nível individual. O programa de pesquisa de um cientista é composto pelos problemas e questões do interesse deste pesquisador, os quais geralmente estão ligados a alguma disciplina científica com corpo teórico minimamente desenvolvido. Este programa ganha maior resolução quando consideramos a intensidade com que o cientista percorre cada uma das vias da caixa preta epistemológica para resolver seus problemas e pela predisposição que este pesquisador tem a fazer interações colaborativas com outros cientistas. Por fim, ainda devemos incluir nesta definição o nível de dissimilaridade em relação ao seu programa que o pesquisador em foco está disposto a aceitar para efetuar uma colaboração. Isso nos leva à ideia de rede complexa de conhecimento formada pelo conjunto de cientistas e seus respectivos programas de pesquisa. É da interação, direta ou indireta, dos cientistas nestas redes que as teorias são geradas, mantidas ou rejeitadas.

Por fim, quero enfatizar que não requiro primazia, muito menos pioneirismo nesta proposta, afinal ela mescla conceitos já trabalhados e intensamente discutidos na literatura. Ademais ela faz relações já conhecidas. Talvez a novidade resida em como organizei os conceitos abordados nesta tese. Minha intenção é que ela seja debatida e criticada, que suas vantagens e limitações sejam levantadas, a fim de que sínteses mais lúcidas e sensatas do que define a ciência em seus aspectos amplos e gerais possam ser elaboradas. Dois pontos importantes que foram levantados, porém não aprofundados nesta tese, são como os componentes psicológico-formationais interagem com a CPE e como se dão os detalhes das interações entre os programas de pesquisa de diferentes cientistas – em termos de como estas interações se manifestam dentro da CPE de cada um deles. Estes são temas que ainda precisam ser analisados mais profundamente para que se possa entender em mais detalhes a CPE. Apesar disso, considero que a caixa preta epistemológica pode ser tomada como um novo ponto de partida (ao menos será para mim) na tentativa de compreender o que é a ciência ou, como Keller nos pergunta, o que dá sentido à vida? Trazendo para o contexto dos temas discutidos nesta tese, investigar mais a fundo a CEP me permitirá (e creio que para qualquer um que se arriscar ao mesmo) entender mais a fundo o que é a ecologia.

Espero que após tantas palavras eu tenha conseguido convencer o leitor (se é que ele já não chegou convencido disso para a leitura) que ciência é um processo em evolução. Teorias surgem e colapsam;

umas demoram mais que outras para colapsar. A pergunta que esteve em voga durante esta tese foi: existe um limite em que a demora tenderá ao infinito e alguma teoria se consolidará como verdade absoluta? Não existe resposta satisfatória para este grande problema epistemológico e talvez sejamos incapazes de responder definitivamente esta pergunta. No entanto, é inegável que o conhecimento científico avança, ou seja, que sabemos um pouco mais hoje do que sabíamos ontem sobre o universo (a natureza). Nossas teorias científicas se aprimoram e um argumento frequente que justifica essa afirmação é o nítido avanço tecnológico decorrente da aplicação de conhecimentos científicos (*e.g.* mandamos foguetes à lua, fazemos microscópios de super resolução capazes de transmitir imagens de moléculas, construímos interferômetros ultra-potentes capazes de detectar ondas gravitacionais que corroboram uma hipótese da teoria de Einstein conjecturada há mais de 100 anos). Esta percepção, a meu ver, é puro reflexo da concepção científica da física impregnada não somente no raciocínio dos cientistas e filósofos em geral, mas também no imaginário popular. Considero que uma evidência mais importante de que a ciência avança, principalmente para o cientista, é que ampliamos nossa capacidade preditiva em relação ao passado, e seria injusto dizer que isso não ocorre na biologia, assim como na ecologia especificamente (mesmo que em taxas ou formas diferentes). Se nos tornaremos capazes, como ecólogos, de prover previsões sobre o mundo biológico tão acuradas e precisas quanto os físicos proveem só o tempo dirá, após muitas e muitas voltas nas CPEs dos diversos cientistas que compõem esta rede complexa do conhecimento. Entretanto, para a pergunta se há ou não uma necessidade obrigatória dos ecólogos seguirem o raciocínio dos físicos (*i.e.* de derivarem previsões de extrema precisão para seus problemas de interesse por meio de métodos nomológicos), creio que esta tese tenha provido argumentos suficientes para mostrar que a resposta mais plausível é não. A ciência é uma atividade epistemologicamente pluralista e aberta ao sincretismo entre diferentes culturas científicas que surgem e se desenvolvem ao longo da história humana.

## 5.1 Perspectivas futuras

Esta longa jornada ao mundo da filosofia – que levou-me à formalização de meu argumento pluralista e de meu ponto de vista atual sobre um programa de pesquisa em ecologia – não poderia ficar apenas no campo abstrato das ideias. Procurando por em prática os conceitos da caixa preta epistemológica, meu orientador Paulo Inácio de Knegt López de Prado, a Dra. Camila Mandai, o Msc. André Chalom e eu, estamos desenvolvendo uma plataforma para a simulação de dinâmicas populacionais em espaço e

tempo contínuos, denominada *TWoLife* (*The Walk of Life*). Nossos objetivos principais em desenvolver esta plataforma é: i) averiguar a possibilidade de *conciliação* entre abordagens de modelagem que se valem de heurísticas diferentes, mas que podem ser usadas para a resolução de problemas em comum, *e.g.* compreender a dinâmica de populações; ii) prover um material que possa ser usado tanto no ensino teórico de ecologia, quanto servir de base para o desenvolvimento de teorias mais complicadas sobre a dinâmica espaço-temporal de populações.

Com isso, visamos uma aproximação com a episteme característica dos físicos, calcada na elaboração de modelos mínimos que descrevem o sistema e posterior derivação de modelos que incorporam dinâmicas mais complicadas. Nosso interesse em usar a heurística *nomológica* é entender quais são os potenciais que a aplicação da abordagem de modelagem por simulações tem de prover avanços teórico-preditivos para a ecologia seguindo um raciocínio próximo ao usado tradicionalmente pelos físicos. Não estamos querendo invalidar a heurística dos modelos orientados a padrão de Grimm e Railsback; esta é apenas uma opção que decorre do problema específico de interesse. A abordagem analítica dos matemáticos e físicos, como discuti nos capítulos anteriores, possui algumas propriedades veneráveis que permitem ao cientista chegar a conclusões de alto grau de generalidade sobre um dado sistema de estudo (em nível conjectural). No entanto, mostrei também que esta abordagem se torna muito complicada para biólogos e ecólogos (por motivos intelectuais e formacionais), as vezes até mesmo para físicos e matemáticos (por motivos técnicos), e que a questão problemática da justificação destas teorias com base em evidência empírica tem sido o grande problema para os usuários desta episteme. A abordagem de modelagem por simulação tem sido assimilada com mais facilidade pelos ecólogos, que sentem-se mais confortáveis em explorar as potencialidades desta heurística – este é especificamente meu caso. Contudo, o grande problema das simulações computacionais é que esta abordagem prove soluções numéricas para os problemas, portanto, a generalização das conclusões sobre o modelo são mais restritas em relação à abordagem de modelos de equações diferenciais. Esses problemas vem sendo superados por técnicas de amostragem e análise do espaço de parâmetro dos modelos (Chalom e Prado, 2012, *e.g.* técnica do hiper-cubo latino), que permitem ao modelador extrair relações estatísticas entre as variáveis e os parâmetros dos modelos.

Um aspecto muito vantajoso da modelagem baseada no indivíduo é que ela pode ser concebida de tal forma que se torna equivalente a modelos de equação-mestre (Black e McKane, 2012), o que evidencia a possibilidade de integração metodológica na modelagem de sistemas dinâmicos. Para isso, Gillespie

(1977) descreveu um algoritmo exato para simulações de processos estocásticos em tempo contínuo. Este algoritmo, embora publicado há quase 40 anos, ainda foi pouco usado na formulação de modelos de simulação para o estudo de problemas ecológicos (mas veja Renshaw, 1993, para uma rara exceção). Desta forma, o TWoLife foi concebido com base neste algoritmo. Infelizmente, uma análise preliminar do comportamento desta plataforma de simulação de dinâmicas populacionais ainda está em andamento e não foi possível apresentar os resultados neste doutorado. Após consolidada estrutura fundamental do TWoLife, esta plataforma poderá facilmente ser aplicada para derivações de modelos mais complicados ou realistas, voltados a previsões mais específicas. Consequentemente, as previsões dos modelos derivados do TWoLife, deverão ser testadas empiricamente e assim minha caixa preta epistemológica vai sendo percorrida em suas principais vias. Por fim, testes empíricos podem gerar novas ideias para novas conjecturas e novas oportunidades de interação cultural (no caso do TWoLife, houve uma interação indireta com os físicos).

## **Bibliografia**

- Black, A. J. e McKane, A. J. 2012. Stochastic formulation of ecological models and their applications. – *Trends in ecology & evolution* 27(6): 337–345.
- Chalom, A. e Prado, P. 2012. Parameter space exploration of ecological models. – arXiv preprint arXiv:1210.6278 .
- Gillespie, D. 1977. Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions. – *Journal of Physical Chemistry* 81(25): 2340–2361.
- Keller, E. 2003. *Making Sense of Life*. – Harvard University Press.
- Mitchel, S. 2004. Why integrative pluralism?. – *E: CO Special Double Issue* 6: 81–91.
- Murray Jr., B. 2001. Are ecological and evolutionary theories scientific?. – *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 76(2): 255–289.
- Norgaard, R. 1989. The case for methodological pluralism. – *Ecological Economics* 1(1): 37–57.
- Peters, R. H. 1976. Tautology in evolution and ecology. – *The American Naturalist* 110(971): 1–12.

- Renshaw, E. 1993. *Modelling Biological Populations in Space and Time*. – Cambridge Studies in Mathematical Biology. Cambridge University Press.
- Roughgarden, J. 1983. Competition and theory in community ecology.. – *American Naturalist* 122(5): 583–601.
- Simberloff, D. 1983. Competition theory, hypothesis-testing, and other community ecological buzzwords. – *American Naturalist* pp. 626–635.
- Vellend, M. 2010. Conceptual synthesis in community ecology. – *Quarterly Review of Biology* 85(2): 183–206.