



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS

EVANDRO ALBIACH BRANCO

CAPITAL NATURAL, CRESCIMENTO ECONÔMICO E RIQUEZA:

Reflexões a partir da abordagem e modelagem de sistemas complexos

São Paulo

2012

EVANDRO ALBIACH BRANCO

Capital Natural, Crescimento Econômico e Riqueza: reflexões a partir da abordagem e modelagem de sistemas complexos

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos da Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre em ciências.

Área de Concentração: ***Ciências Sociais e Ambientais Aplicadas***

Orientador: Prof. Dr. Paulo Antônio de Almeida Sinisgalli

São Paulo

2012

Nome: BRANCO, Evandro Albiach

Título: Capital Natural, Crescimento Econômico e Riqueza: reflexões a partir da abordagem e modelagem de sistemas complexos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos da Escola de Artes, Ciências e Humanidades – Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre em ciências.

Aprovado em: _____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

*Em memória de
Henrique, Rosalina, José e Margarida*

Agradecimentos

À minha família, em especial à minha mãe.

À Maíra, pelo incentivo e apoio incondicional, bom humor, compreensão, pela presença certa e reconfortante. E pelas tediosas e intermináveis revisões.

Ao Prof. Dr. Paulo Sinisgalli, pelos ensinamentos, confiança e amizade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Modelagem de Sistemas Complexos, em especial ao Prof. Dr. Carlos de Brito, pela paciência e interesse.

Aos amigos da EACH, docentes e discentes de Gestão Ambiental, lugar onde foi possível construir toda a base do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

A todos os amigos da *Stepping Stones* e da *Maxwell' Hell*, pelos momentos de descontração tão importantes e necessários à dissipação da entropia inerente ao processo acadêmico.

Aos amigos da SEMA de Suzano, pela compreensão, apoio e valorização.

“When both the study of the household (ecology) and management of the household (economics) can be merged, and when ethics can be extended to include the environment as well as human values, then we can indeed be optimistic about the future of mankind. Accordingly, bringing together these three E’s is the ultimate holism and the great challenge for our future”

Eugene Pleasants Odum

Resumo

BRANCO, E. A. **Capital Natural, Crescimento econômico e riqueza**: reflexões a partir da abordagem e modelagem de sistemas complexos. 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

A histórica desconsideração da variável ambiental dentro da concepção teórica e dos modelos de crescimento econômico revela um posicionamento ideológico muito claro: a resistência na aceitação do ambiente como fator limitante ou mesmo como elemento estratégico do ponto de vista da riqueza de uma nação ou região. Para além das questões mais frequentemente debatidas, que associam os elementos do ambiente a meros insumos necessários aos processos produtivos, a consideração de conceitos não usuais no arcabouço teórico da economia tradicional, como serviços ecossistêmicos, resiliência, entropia e histerese, teria condições de ampliar e relativizar a interpretação de uma série de premissas e dogmas da ciência econômica tradicional.

O conceito de capital natural, neste sentido, apresenta-se como fundamental e estratégico, uma vez que permite acomodar toda a complexidade inerente à dimensão ambiental e relacioná-la com o sistema socioeconômico, adequando e balizando o enquadramento da questão da sustentabilidade. Ainda, o presente trabalho parte da definição fundamentada de que ambos os sistemas - econômico e ambiental - são essencialmente complexos e, que os efeitos das relações entre os mesmos não são triviais e possuem altos níveis de incerteza associados à sua dinâmica.

Dentro dessa orientação, o trabalho se propôs a realizar uma reflexão sobre a sustentabilidade sob a ótica dos sistemas complexos, por meio de uma revisão bibliográfica crítica e de um exercício de modelagem baseada em agentes para a simulação do crescimento econômico considerando a variável ambiental. As análises realizadas indicam que a incorporação de novos conceitos oriundos dos sistemas complexos poderiam estabelecer um novo suporte para a análise de políticas macroeconômicas de crescimento, da sustentabilidade e, em última instância, contribuir com o fortalecimento de premissas básicas da economia ecológica.

Palavras-chave: Capital natural, sustentabilidade, crescimento econômico, sistemas complexos

Abstract

BRANCO, E. A. **Natural capital, economic growth and wealth**: reflections from the approach and modeling of complex systems. 2011. Dissertação (Mestrado) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

The historical disregard of the environmental issue in the theoretical conception and the economic growth models reveals a clear ideological positioning: the resistance to accept the environment as a limiting factor or as a strategic element from the point of view of nations or regions wealth. Beyond the frequently debated questions, that associate the environmental elements to simple inputs that are necessary to productive processes, the consideration of the non-usual concepts of the traditional economic theory, like ecosystem services, resilience, entropy and hysteresis, would give better conditions to expand and relativize the interpretation of a series of premises and traditional economy dogmas.

The natural capital concept, in this sense, represents itself as an essential and strategic concept, since it permits to accommodate all the complexity inherent to the environmental dimension and associate it to the economic system, fitting and marking out the sustainability framework. Still, the present work starts from the definition that both of the systems – environmental and economic – are essentially complex and that the effects of the relations between them are not trivial and have high levels of uncertainty associated to its dynamic.

Whitin this orientation, this work proposed to realize a reflection about sustainability under the complex systems perspective, through a critical literature review and a multi-agent based modeling exercise, to simulate economic growth considering the environmental dimension. This analyses indicated that the incorporation of new concepts, from the complex systems theory, could establish a new support for the macroeconomic policies analysis, as well for the sustainability policies and, ultimately, to contribute to the strengthening of the basic ecological economy premises.

Keywords: Natural, capital, sustainability, economic growth, complex system

Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução do PIB real de 1980 a 2011.....	18
Figura 2 - Crescimento do PIB real no período de 2010 a 2015 no mundo.....	19
Figura 3 - Índices do produto real – PIB e setores – Brasil – 1900 a 2000 (em logs).....	20
Figura 4 - Diagrama de fluxo circular da economia com fugas e injeções.....	31
Figura 5 - Sistema ambiental e seu subsistema econômico	32
Figura 6 - Taxonomia das fontes fundamentais de crescimento econômico	33
Figura 7 - Esquema posicionando os sistemas complexos entre os extremos.....	37
Figura 8 - Esquema com as funções do capital natural e suas relações com as dimensões de influência.....	82
Figura 9 - Esquema geral da função de produção de três fatores adaptado, considerando o capital natural como fator de produção (<i>input</i> produtivo) e provedor direto de bem-estar humano, através dos serviços ecossistêmicos.....	83
Figura 10 - Paisagens de equilíbrio e mudança de estado de equilíbrio	89
Figura 11 - Esquema com os diferentes caminhos ou comportamentos que um ecossistema pode apresentar com a variação de determinadas condições.....	91
Figura 12 - Representação esquemática dos possíveis caminhos de mudanças nos estados de equilíbrio de um sistema.....	92
Figura 13 - Contas Nacionais de Pegada Ecológica.....	96
Figura 14 - Environmental Kuznets Curve.....	109
Figura 15 - Cenários intermediários entre posições extremas sobre a sustentabilidade.....	120
Figura 16 - Representação da malha de <i>patches</i> formando o mundo no modelo.....	124
Figura 17 - Possibilidades de posicionamento do <i>slider</i> "Qualidade-ambiental-inicial".	126
Figura 18 - <i>Slider</i> "Taxa de regeneração" do ambiente	127
Figura 19 - Slider para o controle do número de <i>patches</i> com comportamento de ruptura...	128
Figura 20 - Possibilidades de comportamento do kn quando submetido à processos de depleção.....	128

Figura 21 - Possibilidades de regeneração do Kn para depleção linear. Retorno linear(b) ou histerese (c).....	130
Figura 22 - Possibilidades de regeneração do Kn para <i>patches</i> com depleção a partir de comportamento de ruptura: retorno pelo mesmo caminho da ruptura(b) ou histerese (c). ..	131
Figura 23 - Slider "Limite-Ruptura-Demanda"	137
Figura 24 - Controles para a taxação da produção e investimento no capital natural.....	138
Figura 25 - Interface gráfica do ambiente.....	139

Índice de Quadros e Tabelas

Quadro 1 - As Cinco Ideias que distinguem a Economia Tradicional da "Economia da Complexidade"	39
Quadro 2 - Diferenciação dos paradigmas da Velha Economia e da Nova Economia, de acordo com o pensamento de Arthur.	40
Quadro 3 - Relações entre a variável ambiental e as escolas de pensamento econômico.....	72
Quadro 4 - Propriedades que regem comportamentos de sistemas ecológicos.....	88
Quadro 5 - Quadro síntese dos comportamentos e regras dos <i>patches</i>	132
Quadro 6 - Definição do raio de visão dos agentes.	134
Quadro 7 - Condições iniciais das simulações realizadas.	140

Resumo	vii
Abstract	viii
Índice de Figuras	ix
Índice de Quadros e Tabelas	xi

Apresentação	14
---------------------	-----------

INTRODUÇÃO	18
-------------------	-----------

Capítulo 1	COMPLEXAS RELAÇÕES ENTRE OS SISTEMAS ECONÔMICO E ECOLÓGICO	28
-------------------	---	-----------

1.1 Abordagem sistêmica	29
1.2 Sistemas complexos adaptativos	34
1.3 Sistemas Econômicos e Ecológicos como sistemas complexos	37
1.4 Por que simular?	43

Capítulo 2	O SISTEMA ECONÔMICO E O CRESCIMENTO ECONÔMICO	47
-------------------	--	-----------

2.1 Teorias e modelos de crescimento econômico	48
2.1.1 Escola Clássica	49
2.1.2 Schumpeter	56
2.1.3 Harrod-Domar, Solow e a Escola Neoclássica	59
2.1.4 Abordagem evolucionista	66
2.2 A variável ambiental nos modelos de crescimento	70
2.3 Crescimento Econômico, Riqueza e Prosperidade	74

Capítulo 3	O SISTEMA ECOLÓGICO E O CAPITAL NATURAL	79
-------------------	--	-----------

3.1 Conceito de capital natural	79
3.2 Criticidade do capital natural	85
3.3 Estabilidade, resiliência e histerese	87
3.4 Indicadores de resiliência ecossistêmica	93

Capítulo 4	ECONOMIA ECOLÓGICA E SUSTENTABILIDADE(S)	100
	4.1 Processos produtivos e entropia	100
	4.2 Progresso tecnológico	106
	4.3 Sustentabilidade(s) e o " <i>Interest in between</i> "	113
Capítulo 5	MODELO PROPOSTO E SIMULAÇÕES	122
	5.1 Modelagem do Sistema Ambiental estilizado	123
	5.1.1 Premissas do compartimento Ambiental	124
	5.1.2 Composição do ambiente	125
	5.1.3 Comportamento dos <i>patches</i>	126
	5.2 Modelagem do Sistema Econômico estilizado	132
	5.2.1 Premissas do compartimento Econômico	133
	5.2.2 Composição e comportamento dos agentes e do mercado	133
	5.3 Modelagem de funções de controle externo	136
	5.3.1 Influência da demanda com percepção ambiental	136
	5.3.3 Taxação dos agentes produtores e investimentos no kn	138
	5.4 Simulações e resultados	138
	CONCLUSÕES	155
	Referências	161
	ANEXO I - Código do modelo proposto	178
	ANEXO II - Possibilidades de ajuste no código para alteração dos parâmetros	184

Questão inerente a qualquer estudo inter e multidisciplinar, as relações entre teorias e conceitos distintos e a construção de um olhar a partir das interfaces apresentam evidentes dificuldades. O estudo pretendido por esta dissertação situa-se exatamente em uma ainda obscura e pouca reconhecida área de interseção entre os campos de estudo da economia, da ciência ambiental e da complexidade.

Embora vertentes como a Economia Ecológica e a Economia da Complexidade já representem avanços significativos em relação às abordagens econômicas tradicionais, é possível afirmar com segurança que nem todas as interfaces são consideradas, tanto em uma como na outra área. A maioria dos estudos em Economia Ecológica nem ao menos reconhece as potencialidades da teoria de sistemas complexos como uma lente de observação inovadora dos fenômenos socioeconômicos e ambientais, principalmente em sua dimensão metodológica. Da mesma forma, a chamada Economia da Complexidade dá pouca atenção às relações entre o seu objeto principal de análise e as dinâmicas ecossistêmicas, de uma forma geral. A compatibilização entre campos de pesquisa tão promissores e na fronteira do conhecimento, entretanto, não é trivial.

A complexidade da articulação entre os referidos temas pôde ser experimentada no simples exercício de construção do fio lógico deste trabalho. Muito embora os temas, teorias e conceitos sejam bem caracterizados e diferenciáveis, pelo menos em uma primeira e superficial análise, emergem do seu desenvolvimento diversas relações entre as demais partes. De fato, a articulação entre os temas desta dissertação apresentou-se como um desafio à parte. Os temas e conceitos de cada parte não são estanques, e são necessários ao entendimento de diversas outras partes do trabalho.

O trabalho é apresentado em cinco capítulos sequenciais que, entretanto, mantém relações com todas as demais partes da dissertação. Os quatro capítulos iniciais realizam uma discussão crítica a partir de uma revisão bibliográfica sobre cada tema específico. O capítulo 5 difere dos anteriores, pois apresenta um exercício de modelagem com o objetivo

de sintetizar os principais conceitos tratados previamente. Neste sentido, o método é alterado neste último capítulo, com a construção de um modelo baseado em agentes realizado através da linguagem de programação netlogo.

O Capítulo 1 trata do enquadramento das áreas de estudo - economia e ciência ambiental - a partir da abordagem sistêmica e da teoria dos sistemas complexos adaptativos. Ainda, apresenta justificativas, baseadas no enquadramento proposto, para a utilização da modelagem e da simulação como ferramentas potenciais de análise.

A partir desta base e do enquadramento proposto, os sistemas econômico e ambiental serão apresentados nos capítulos 2 e 3. Ambos os sistemas, contudo, serão tratados apenas sob a ótica da sua relação com os objetivos do trabalho.

O foco do Capítulo 2 são as principais teorias de crescimento econômico, partindo de um breve histórico sobre as principais escolas e teóricos do tema e dos principais modelos que orientam as análises da área. Também é realizada uma reflexão sobre a inserção ou as formas de consideração da variável ambiental dentro das diversas escolas econômicas apresentadas. O capítulo é concluído com uma discussão sobre os conceitos de crescimento econômico, riqueza e prosperidade e a relação desses temas com a variável ambiental, direcionando o foco do trabalho para o Capítulo 3.

Todo o Capítulo 3 está centrado no conceito de capital natural. São abordadas questões como os diversos componentes que podem ser congregados sob o conceito, a questão da criticidade, suas relações com mecanismos e propriedades típicas de sistemas complexos, além das diversas possibilidades de mensuração a partir de indicadores ecossistêmicos.

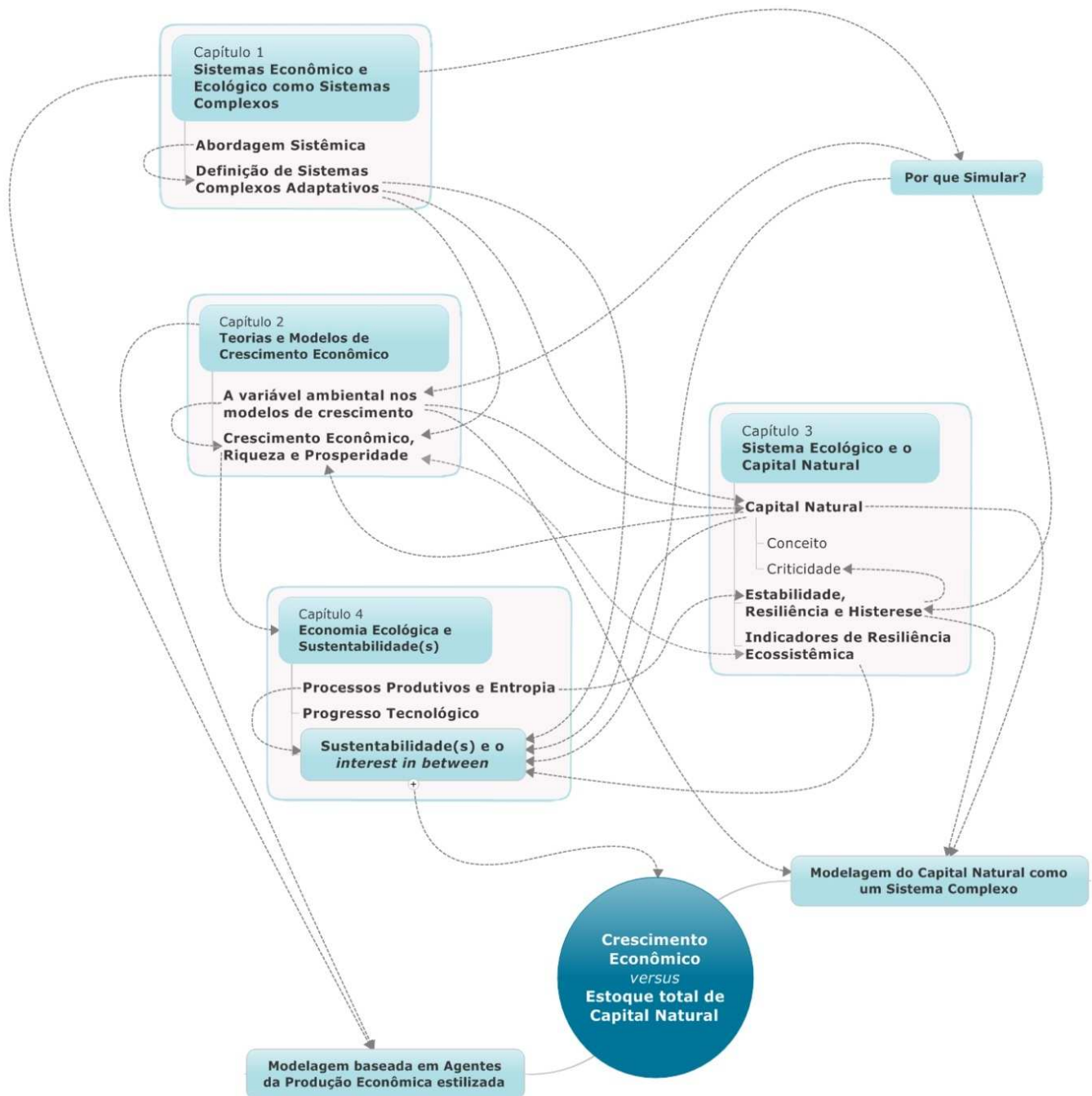
O Capítulo 4 trata da Economia Ecológica e da sustentabilidade como um conceito mediador dos temas tratados nos dois capítulos anteriores. São abordadas questões como a entropia e sua (des)consideração dentro dos processos produtivos e a questão do progresso tecnológico, tema tão central nas modernas discussões sobre o crescimento econômico. Por fim, o capítulo é encerrado com uma discussão sobre o "*interest in between*", expressão muito utilizada por Miller e Page (2007) para definir o objeto de análise da complexidade e

quase a totalidade dos fenômenos do mundo real, e suas possíveis relações com a sustentabilidade.

O Capítulo 5 limita-se a apresentar um exercício de modelagem proposto, com o objetivo de sintetizar e ilustrar as principais hipóteses levantadas pelo trabalho, bem como apresentar algumas possibilidades de simulação e as relações com a sustentabilidade. Neste sentido, o capítulo é dividido em 4 partes. A primeira parte apresenta as premissas e as regras de composição para a modelagem do compartimento ambiental, com o foco nas dinâmicas heterogêneas para o capital natural. A segunda parte apresenta um sistema econômico simples e estilizado, com agentes representando empresas que produzem a partir de seu estoque de capital e do capital natural disponível no ambiente. A terceira parte descreve possíveis formas de controle externo, como a influência da demanda - ou o comportamento agregado dos consumidores - com especial atenção para a percepção ambiental, e a taxa de agentes produtores e sua reversão em investimentos no próprio capital natural. A quarta parte apresenta os principais resultados de simulações realizadas em diferentes cenários iniciais.

Embora delimitados e discutidos em capítulos, é importante ter em mente que temas como sistemas complexos adaptativos, capital natural, riqueza e sustentabilidade são transversais a praticamente todo o trabalho.

Por fim, apresento minhas escusas em razão da demasiada utilização do recurso da nota de rodapé. Tal estratégia teve por objetivo garantir o foco em relação ao texto principal sem, entretanto, deixar passar questões paralelas de suporte a conceitos e temas abordados, ou abrir outras frentes de análise.



Embora marcada por oscilações significativas, os números da economia mundial, principalmente a partir do período pós-guerra, evidenciam uma tendência geral de crescimento (PARKIN, 2003; GORDON, 2000). O gráfico abaixo (figura 1) ilustra o desempenho das economias de países desenvolvidos, de países emergentes ou com economias em desenvolvimento e do mundo como um todo a partir de 1980, com taxas continuamente positivas¹.

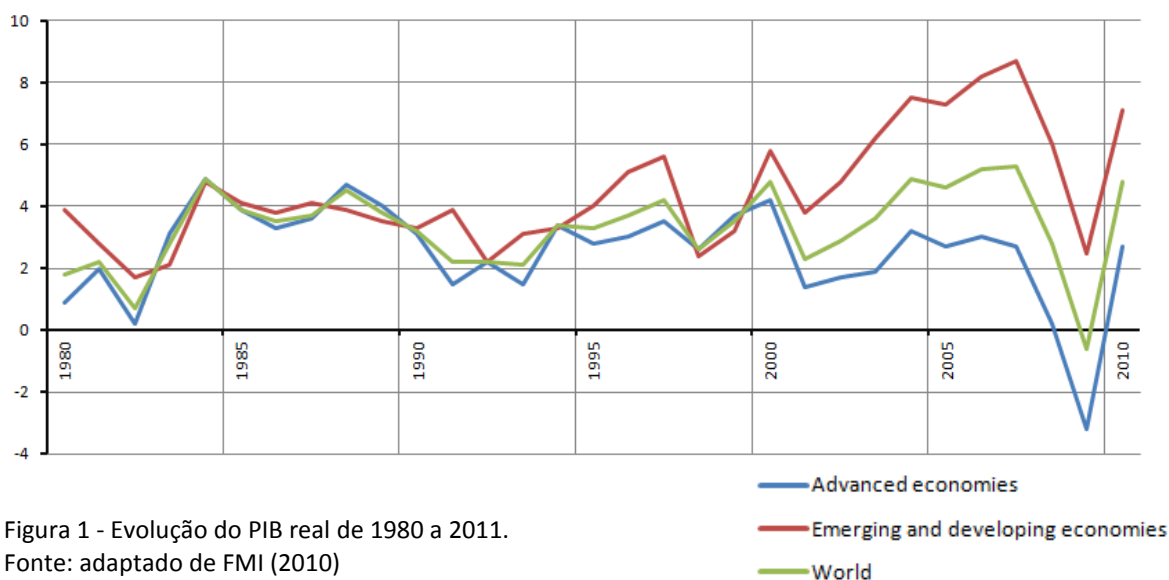


Figura 1 - Evolução do PIB real de 1980 a 2011.

Fonte: adaptado de FMI (2010)

Essa tendência geral é reforçada nas projeções para os próximos anos representadas nos mapas abaixo (figura 2). Muito embora economias importantes como os Estados Unidos e a Europa Ocidental apresentem taxas relativamente baixas de crescimento do PIB², sem grandes evoluções para os próximos anos, os índices são continuamente positivos³. Essa tendência é fortalecida principalmente pelo comportamento do grupo de países que

¹ No período considerado pelo gráfico apresentado na figura 1, a única exceção é representada pela crise de 2009, conhecida como a crise dos *subprimes* (SOROS, 2008).

² Produto interno bruto representa a medida do produto agregado, ou a soma do valor de todos os bens e serviços finais produzidos efetivamente no mercado durante um determinado período de tempo (GORDON, 2000)

³ Gordon (2000) afirma que, mesmo taxas de crescimento aparentemente baixas podem levar à mudanças significativas quando avaliadas a partir de uma ótica de longo prazo e, por isso, suas consequências devem ser sempre consideradas.

compõe o chamado BRIC⁴ – Brasil, Rússia, Índia e China, com taxas de crescimento bem mais expressivas.

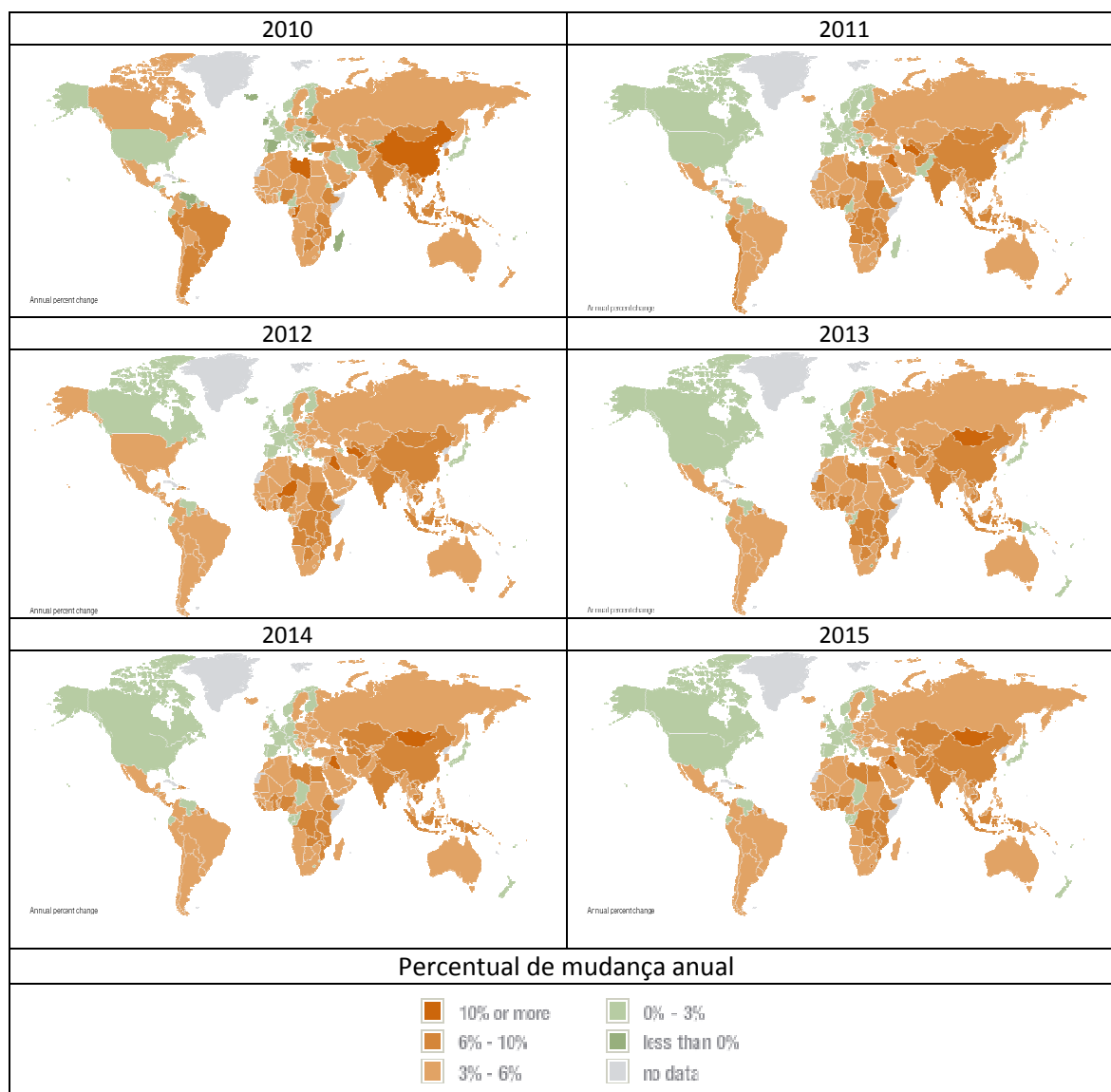


Figura 2 - Crescimento do PIB real no período de 2010 a 2015 no mundo.
 Fonte: IMF Data Mapper – World Economic Outlook (October 2010) adaptado.

No Brasil, entre 1901 e 2000, a população brasileira saltou de 17,4 para 169,6 milhões de pessoas, e o PIB per capita brasileiro no mesmo período cresceu quase 12 vezes, com crescimento geométrico médio de 2,5% ao ano, com forte alta a partir de 1920 (IBGE, 2006).

⁴ Termo cunhado pelo economista Jim O'Neill em 2001.

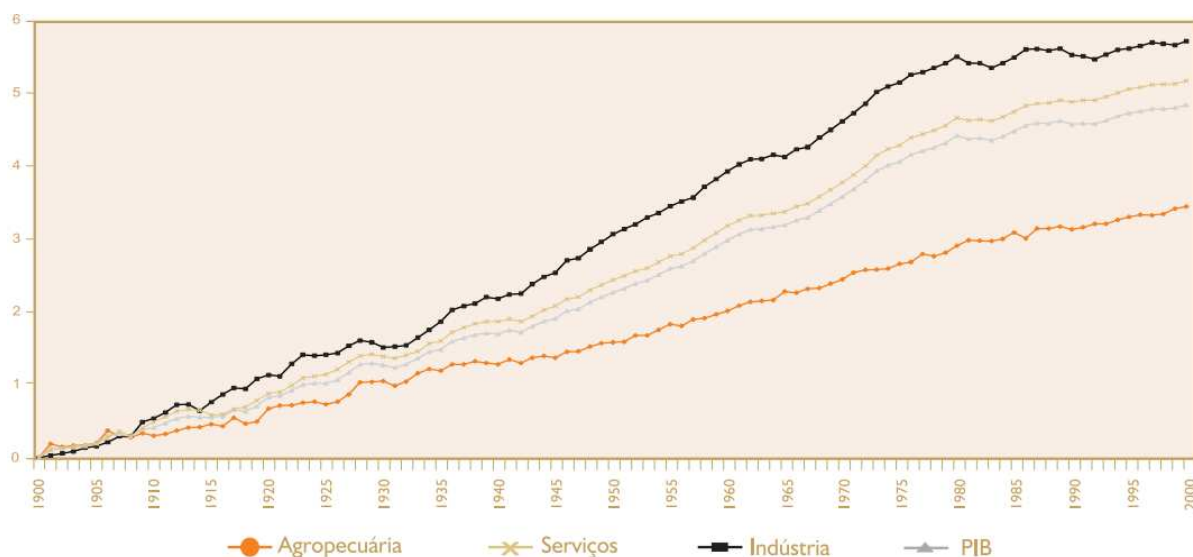


Figura 3 - Índices do produto real – PIB e setores – Brasil – 1900 a 2000 (em logs).
Fonte: IBGE (2006)

Os dados divulgados pelo IBGE (2012a) apontam que o PIB brasileiro encerrou o ano de 2010 com um crescimento de 7,5% em relação a 2009, acumulando no ano, em valores correntes, 3.770 bilhões de reais. Mesmo beneficiado pela baixa base de comparação no ano anterior, o crescimento acumulado é considerado o mais elevado desde 1986. Mais modesto, em 2011, o PIB brasileiro cresceu 2,7% em relação a 2010 atingindo, em valores correntes, 4.143 bilhões de reais (IBGE, 2012a).

Da mesma forma, o PIB *per capita* alcançou a marca de R\$ 19.508,59 em 2010, em valores reais, com uma variação em volume de 6,5% em relação a 2009 (IBGE, 2012a). Em relação à década encerrada em 2010, o PIB *per capita* registrou crescimento anual médio de 2,4% (IBGE, 2010). Em 2011, o PIB *per capita* variou 1,8% em relação a 2010 atingindo, em valores correntes, R\$ 21.252.41 (IBGE, 2012a).

A perseguição de índices de crescimento cada vez mais altos passou a ser a grande e principal meta de qualquer política macroeconômica considerada séria e responsável, subjulgando uma série de questões fundamentais e de base. Questões como as relações entre as taxas reais de crescimento econômico e o desenvolvimento de uma nação, ou a qualidade de vida da sociedade, soam como obviedades e estão cada vez mais distantes do objeto de análise da ciência econômica.

É nítido que não há nenhum movimento, do ponto de vista dos formuladores de políticas macroeconômicas, de questionar o papel do crescimento econômico como o estandarte do desenvolvimento nacional. Muito pelo contrário. O crescimento como fim em si mesmo extrapolou todas as possíveis relações com a qualidade de vida e conceitos mais amplos de desenvolvimento. O cenário político-econômico atual impõe a norma do crescimento econômico como se não houvesse alternativa para o sucesso de uma nação.

É tarefa simples perceber o nível de importância ao qual o crescimento econômico atingiu a partir de um rápido exame de dados de instituições oficiais voltadas à política econômica e de livros-texto sobre macroeconomia. Praticamente todos os manuais sobre o tema trazem um tópico introdutório elucidando a questão. De uma maneira geral, o crescimento econômico é frequentemente associado à diminuição da escassez⁵ e à elevação do padrão de vida médio. Mais do que uma associação de fatores, a relação é apresentada como necessária e indissociável (GORDON, 2000; HALL; LIEBERMAN, 2003; MANKIW, 2008).

A evidente falta de clareza na apresentação e na consideração dos conceitos de crescimento e desenvolvimento econômico dificulta a superação de questões importantes do ponto de vista dos reais objetivos de uma nação. Furtado (1978) reforça este ponto quando afirma que a idéia de desenvolvimento que predominou a partir da segunda metade do século XX é a da performance econômica no cenário internacional.

Entretanto, o foco na busca das metas de crescimento nem sempre considera o real sentido do termo desenvolvimento, que extrapola a lógica meramente econômica. A associação considerada quase como inerente entre desenvolvimento e crescimento econômico ratifica a lógica prevista por Furtado (1978) e consolida-se quase como um dogma. Porém, uma análise mais rigorosa sobre esses dois objetivos revela algumas imprecisões importantes.

Um **primeiro aspecto** significativo a ser observado é a própria questão conceitual. De uma maneira geral, a definição dos conceitos de crescimento e desenvolvimento econômico não é exata ou livre de interpretações. Pelo contrário, a análise das diversas abordagens do

⁵ O conceito de escassez está relacionado ao confronto entre necessidades ilimitadas e recursos econômicos limitados. Está relacionado à prosperidade ou à riqueza proporcionada pelo sistema econômico, visando o acesso ao máximo de bens e serviços.

tema revela que os conceitos foram construídos e adaptados de acordo com cada época e contexto sociopolítico (PIMENTEL, 2007).

Veiga (2003) recorda que, até meados dos anos 1950, nenhuma distinção era feita entre as noções de desenvolvimento e de crescimento econômico⁶. Embora seja relativamente frequente a confusão entre os termos, mesmo em autores contemporâneos⁷, existem diferenças fundamentais na definição dos conceitos.

Gremaud *et al.* (2003) conceituam crescimento econômico como o aumento contínuo⁸ do PIB em termos globais e *per capita*, ao longo do tempo. Complementarmente, Brue (2005) conceitua crescimento econômico como o aumento da produção real de um país que ocorre durante determinado período, como resultado de três fatores: a) maior quantidade de recursos naturais, recursos humanos e capital; b) de melhorias na qualidade dos recursos e; c) avanços tecnológicos que impulsionam a produtividade⁹. Daly e Farley (2004) conceituam crescimento econômico como um aumento quantitativo, em dimensão física da economia, na produção econômica.

Interessante também é notar como é percebida a relação entre o crescimento econômico e o desenvolvimento. Gremaud *et al.* (2003) lembram que existem evidências de que é possível um país crescer sem se desenvolver, mas o contrário não. Amparado por Kindleberger e Herrick (1977)¹⁰, os autores salientam que “para que haja desenvolvimento é

⁶ Uma exceção a essa afirmação são os trabalhos de Schumpeter, que será objeto de análise no capítulo 2.

⁷ Delfim Netto e Ikeda (2009) afirmam que “desenvolvimento econômico é apenas um codinome para a relação PIB / força de trabalho ou PIB / População, que mede a produtividade do trabalho”. Como veremos tal definição não esgota o conceito de desenvolvimento, sendo muito mais adequado à mensuração do crescimento econômico. Fendt (2009) compartilha do mesmo conceito evidenciado já no título de seu artigo “Desenvolvimento é o aumento persistente da produtividade do trabalho”. No mesmo sentido, Bresser-Pereira (2006) afirma que “desenvolvimento econômico é o processo histórico de crescimento sustentado da renda ou do valor adicionado por habitante implicando a melhoria do padrão de vida da população de um determinado estado nacional, que resulta da sistemática acumulação de capital e da incorporação de conhecimento ou progresso técnico à produção.”.

⁸ Li e Gao (2008) afirmam que os movimentos econômicos são, geralmente, decompostos em dois subcampos: o primeiro é a teoria do crescimento econômico, que se preocupa com as tendências de longo prazo, enquanto o segundo, conhecido como teoria das flutuações econômicas, ou teoria do ciclo econômico, foca nos desvios da tendência no curto prazo. Gremaud *et al.* (2003) afirma que todas as teorias do crescimento econômico desenvolvidas a partir das premissas neoclássicas consideram o crescimento como um processo gradual e contínuo, harmonioso e cumulativo. Stiglitz e Walsh (2003) e Mankiw (2008) concordam com essa afirmação.

⁹ Produtividade, em termos simples, é definida como a razão de saídas em relação às entradas (ou insumos) dentro de um processo produtivo (Jackson e Victor, 2011).

¹⁰ KINDLEBERGER, C. P.; HERRICK, B. Economic development. Ed. New York: McGraw-Hill, 1977.

necessário que haja crescimento” (GREMAUD *et al.*, 2003, p. 485). Tal posição é compartilhada por Amaral, Serra e Estevão (2008).

A partir da consolidação da chamada síntese neoclássica¹¹, o crescimento econômico passou a ser visto como a chave do sucesso e condição necessária ao desenvolvimento de um país.

O marco, porém, na revisão dos conceitos foi a publicação do Relatório do Desenvolvimento Humano pelo PNUD¹², em 1990. A publicação lançou o IDH – Índice de Desenvolvimento Humano. A partir da análise desse novo índice, ficou claro que não havia um paralelismo necessário entre o crescimento do PIB e a leitura do IDH, e foi evidenciada a necessidade de tornar os conceitos mais precisos (VEIGA, 2003).

Mais amplo e complexo, o termo desenvolvimento abarca outras dimensões, extrapolando a esfera econômica. Amaral, Serra e Estevão (2008) lembram também que o termo deve considerar questões de cultura, de qualidade de vida, de bem-estar social, de autonomia pessoal, questões essas que só surgem muito lateralmente nos estudos do crescimento econômico. Furtado (1974) e Sachs (2003) concordam com essa visão, já que afirmam que só pode haver desenvolvimento onde houver um projeto social subjacente.

Neste sentido, Gremaud *et al.* (2003, p. 485) conceituam desenvolvimento econômico como “além das mudanças de caráter quantitativo dos níveis do produto nacional, as modificações que alteram a composição do produto e a alocação dos recursos pelos diferentes setores da economia”. Os autores elencam três fatores que caracterizam um processo de desenvolvimento econômico ao longo do tempo: a) crescimento do bem-estar econômico, medido por indicadores como o PIB e o PIB per capita; b) diminuição dos níveis de pobreza, desemprego e desigualdade e; c) melhoria das condições de saúde, nutrição, educação, moradia e transporte.

De acordo com Abramovay (2001), mais recentemente, três correntes principais na análise acadêmica do desenvolvimento podem ser destacadas: o novo institucionalismo de

¹¹ Mais sob a chamada síntese neoclássica será apresentado no Capítulo 2, tópico 2.1.3.

¹² Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.

Douglas North; as relações entre renda, produtividade e desenvolvimento defendidas por Joseph Stiglitz e as reflexões sobre as liberdades, de Amartya Sen.

A abordagem de Sen (2010), por sua abrangência e reconhecimento, é emblemática da nova concepção de desenvolvimento. Sen (2010) considera que o desenvolvimento pode ser visto como um processo de expansão das liberdades reais que os indivíduos desfrutam e, neste sentido, poderia ser traduzido como a superação de privações como a pobreza extrema, a fome coletiva, a marginalização social, a privação de direitos básicos, a carência de oportunidades, a opressão e a insegurança econômica, política e social.

Neste sentido, Sen (2010) salienta que o desenvolvimento teria como meta principal prover os indivíduos da condição de agente, entendido este termo como “alguém que age e ocasiona mudança e cujas realizações podem ser julgadas de acordo com seus próprios valores e objetivos, independentemente de as avaliarmos ou não também segundo algum critério externo” (op. cit, p. 34). Ainda, Sen (2010) complementa que o desenvolvimento deveria ocupar-se na “promoção da condição de agente do indivíduo como membro do público e como participante das ações econômicas, sociais e políticas” (op. cit, p. 34).

É evidente que essa concepção de desenvolvimento não permite a utilização de um índice meramente econômico como um indicador de desempenho adequado e sensível às mudanças ou expansão das referidas liberdades reais de Sen.

O **segundo aspecto**, e talvez mais importante e que precisa ser analisado com mais cuidado, é a questão do crescimento como mecanismo para a diminuição da escassez. Para avaliar este tópico é necessário situar adequadamente o sistema econômico como um subsistema de um sistema maior – o ambiental ou, conforme Daly e Farley (2004), o ecossistêmico. Ou seja, o sistema econômico não pode ser considerado um sistema isolado¹³.

¹³ Classe de sistema no qual não há entrada ou saída de matéria ou energia (DALY; FARLEY, 2004).

Esta definição é importante, pois estabelece um limite à expansão da economia, e seu crescimento físico deve ser avaliado de acordo com os custos de oportunidade¹⁴ envolvidos, principalmente através da diminuição do estoque de capital natural¹⁵ disponível (DALY; FARLEY, 2004; ANDRADE; ROMEIRO, 2009).

Neste sentido, a diminuição da escassez é relativa, uma vez que não é gratuita e implica em *trade-offs* importantes, contundentemente desconsiderados nas análises macroeconômicas.

Porém, tal questionamento não é recente. Há mais de quatro décadas economistas vêm debatendo questões como os processos de criação de riqueza e as possibilidades de existência de limites ao processo de crescimento econômico (CORAZZA, 2005a) e suas relações com a qualidade ambiental.

Booth (1998) afirma que a causa primordial dos problemas ambientais está centrada nos mecanismos macroeconômicos orientados para o crescimento, contrariando a visão convencional, que as atribui à microeconomia, às falhas do sistema de precificação, às dificuldades para a internalização das externalidades ambientais e à otimização na alocação dos recursos (BOOTH, 1998; DALY, 1991a).

De fato, a priorização do aumento quantitativo na escala da produção pressiona o sistema que sustenta a economia, principalmente por meio da maior demanda por matérias e energia e maiores saídas de rejeitos. A simples adequação dos sistemas de precificação do capital natural não pode garantir, por si só, a adequação das demandas do subsistema econômico à capacidade de suporte do sistema maior – o ambiental (DALY; FARLEY, 2004).

¹⁴ Custo de oportunidade pode ser definido como a melhor alternativa viável que precisa ser sacrificada no momento em que uma escolha é realizada (DALY; FARLEY, 2004).

¹⁵ Capital natural pode ser definido como um estoque que rende um fluxo de serviços e recursos naturais tangíveis (DALY; FARLEY, 2004), ou como a totalidade dos recursos naturais disponíveis que rendem fluxos de benefícios tangíveis e intangíveis ao homem (ANDRADE; ROMEIRO, 2009). Este conceito será detalhado no capítulo 3.

A ausência da contabilidade de todos os ativos envolvidos nas atividades econômicas torna a análise da teoria do crescimento econômico limitada e problemática sob o ponto de vista da sustentabilidade¹⁶.

Desta forma, o fortalecimento do conceito de capital natural, devidamente compreendido, poderia complementar e corrigir as inconsistências dos modelos de crescimento econômico, possibilitando compreender melhor as relações entre os sistemas econômico e ambiental, além da sua contribuição direta para o bem-estar social.

A fragilidade da contextualização da variável ambiental dentro dos processos de crescimento econômico e criação de riqueza, e consequentemente, da análise da questão da sustentabilidade, principalmente em relação ao viés metodológico, representa a principal motivação para o desenvolvimento do presente estudo.

Neste sentido, o recente trabalho de Gasparatos e Scolobig (2012) sistematiza as principais ferramentas metodológicas desenvolvidas nos últimos 25 anos para a análise da sustentabilidade, e evidencia o peso desproporcional das avaliações monetárias e essencialmente estáticas, revelando as dificuldades no avanço de novas frentes de enfrentamento metodológico para o tema.

Diante de todo o exposto, o objetivo central da presente dissertação é debater o conceito de sustentabilidade, dentro da perspectiva dinâmica - e suas diferentes dimensões e definições - à luz da ótica dos sistemas complexos.

Delimitam-se, como objetivos específicos:

- a) A elaboração de um modelo baseado em agentes para a simulação dos diversos comportamentos do capital natural quando submetido a diferentes níveis de pressão, bem como do crescimento econômico em um mercado estilizado;
- b) Demonstrar, através da simulação, como os conceitos que suportam a análise da sustentabilidade podem ser melhor enquadrados quando inseridos em cenários dinâmicos e complexos;

¹⁶ Os conceitos de sustentabilidade serão apresentados no capítulo 4, tópico 4.3.

c) Realizar uma discussão sobre as taxas reais de crescimento quando contabilizadas conjuntamente com as alterações no capital natural, e as relações dessa dinâmica com os conceitos de riqueza e prosperidade.

Neste sentido, toda a construção do presente trabalho foi baseada na seguinte pergunta central: *A abordagem e modelagem de sistemas complexos pode contribuir para a evolução das análises da sustentabilidade?*

O trabalho parte da hipótese que a sustentabilidade deve ser analisada sob o ponto de vista dinâmico, dentro da perspectiva de sistemas complexos, uma vez que estes são elementos inerentes à própria definição de sustentabilidade. Ainda, que a consideração do campo de estudos dos sistemas complexos adaptativos como suporte às análises econômico-ecológicas poderia contribuir para a evolução das discussões sobre o tema da sustentabilidade, fornecendo instrumentos de análise mais adequados.

Complementarmente e conseqüentemente, as abordagens e teorias tradicionais no enfrentamento da questão seriam insuficientes do ponto de vista metodológico e mesmo do ponto de vista da aplicação do conceito como suporte à determinação de políticas públicas macroeconômicas e ambientais.

Considerando que o foco maior deste trabalho é a realização de uma análise das relações na interface entre os sistemas econômico e ecológico e suas relações com a sustentabilidade, é importante realizar previamente algumas reflexões e situar alguns pressupostos teóricos de base que serão utilizados no decorrer das análises delineadas pelo trabalho.

Um dos pontos principais nos quais se apoiam todo o desdobramento lógico deste trabalho, conforme hipótese apresentada anteriormente é a afirmação que tanto o sistema econômico como o ambiental apenas podem ser adequadamente avaliados e compreendidos se forem ambos enquadrados como sistemas complexos adaptativos¹⁷. Neste sentido, é plausível aceitar que a relação entre dois sistemas complexos resultará em situações e cenários com um grau ainda maior de imprevisibilidade e incertezas, embora ainda regidos pelos mesmos fenômenos.

Neste primeiro capítulo serão apresentados o conceito de sistemas complexos adaptativos, suas principais características e especificidades. Ainda, como o objeto é a relação entre sistemas, será realizada uma breve consideração sobre a contextualização desses sistemas um em relação ao outro. Na sequência, ambos os sistemas serão avaliados à luz da teoria dos sistemas complexos adaptativos e, por fim, será apresentado e justificado o uso da simulação como instrumento para a análise de sistemas complexos.

¹⁷ Premissa apoiada por Costanza *et al* (1993).

1.1 Abordagem sistêmica

Kay (2008) afirma que uma das questões mais enigmáticas na análise da sustentabilidade¹⁸ é o fato de que tudo parece acontecer ao mesmo tempo. Alterações em diferentes dimensões e escalas ocorrem paralelamente e afetam-se mutuamente, em diferentes graus de intensidade. Diferentes agentes operando em diferentes intensidades e escalas sob um sistema que responde também de maneira heterogênea e não linear configuram um mundo com enormes dificuldades de enquadramento, avaliação e previsão, como será visto mais adiante, no tópico 1.2.

Neste sentido, o reducionismo cartesiano do "*dividir para conhecer*" (CHRISTOFOLETTI, 1999) não faz sentido. Análises baseadas no reducionismo disciplinar apresentam-se como inadequadas e completamente ineficientes para tratar as questões relacionadas à complexidade do mundo real e, conseqüentemente, do universo de interação entre os sistemas econômico e ambiental.

A abordagem sistêmica, em contrapartida, tem o potencial de transpor as limitações impostas pelas barreiras metodológicas disciplinares por meio de uma linguagem e estruturas conceituais que possibilitam um olhar holístico sobre fenômenos complexos.

A premissa principal do pensamento sistêmico é que o comportamento de um sistema como um todo não pode ser explicado unicamente pela soma dos comportamentos de partes ou elementos individuais (KAY, 2008). Tal premissa está na base do pensamento do pioneiro da teoria dos sistemas, von Bertalanfly (1968). Neste mesmo sentido, partes postas em conjunto não necessariamente compõe um sistema (VOINOV, 2008). Assim, Voinov (2008) define um sistema como a combinação de partes que interagem e produzem alguma nova qualidade por meio dessas interações.

¹⁸ Importante lembrar novamente que os conceitos de sustentabilidade serão detalhados no capítulo 4.

O pensamento sistêmico considera que cada sistema é parte de um sistema maior, da mesma forma que cada elemento ou componente de um sistema pode também ser visto como um sistema próprio, ou subsistema (VOINOV, 2008).

A relação de hierarquização entre sistemas e subsistemas é de extrema importância para as análises pretendidas entre os compartimentos econômico e ambiental. O posicionamento do sistema econômico como o todo ou como um subsistema possui a capacidade de alterar completamente o resultado da análise do fenômeno. Neste sentido, é oportuno inserir brevemente o pensamento de Daly e Farley (2004) sobre a questão.

A consideração do sistema econômico a partir do tradicional diagrama de fluxo circular¹⁹ (figura 4) indica, implicitamente, que o sistema econômico²⁰ é considerado como o todo, principalmente porque o sistema é dado e subentendido como isolado, ou seja, nada, a partir de fora, entra no sistema, e nada sai do sistema. As fugas e injeções são consideradas apenas expansões do sistema isolado (DALY; FARLEY, 2004).

¹⁹ Esquema fundamental no entendimento das relações entre produção e consumo, unindo micro e macroeconomia, com as inserções das políticas monetária, fiscal e cambial (DALY; FARLEY, 2004)

²⁰ Daly e Farley (2004) tratam especificamente do sistema econômico produtivo, com bases físicas.

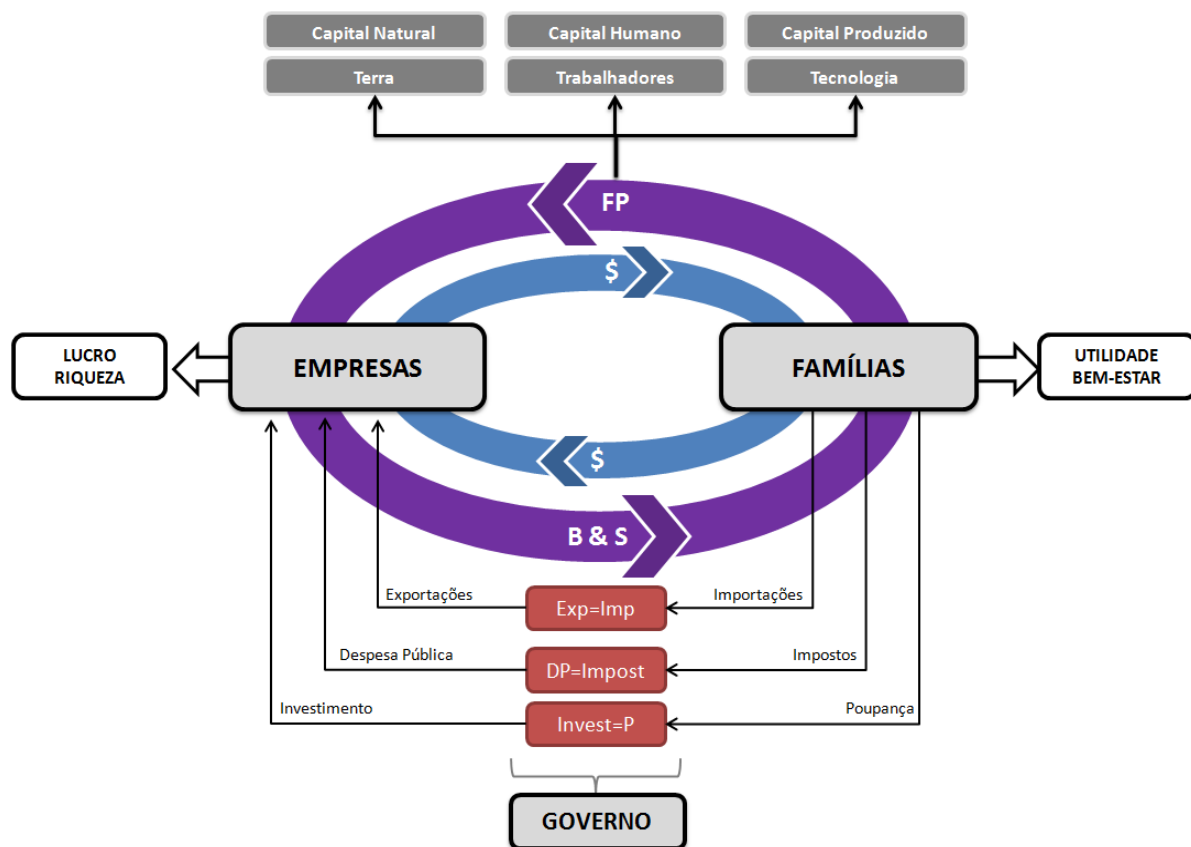


Figura 4 - Diagrama de fluxo circular da economia com fugas e injeções.

FP = Fatores de Produção; B&S=Bens e serviços.

Fonte: Adaptado de Daly e Farley (2004).

Como é evidente que o sistema econômico, no mundo real, necessita de admissões de matéria ou energia, que geram resíduos, visto que não é uma máquina de movimento perpétuo²¹ (CECHIN, 2008), há notadamente um equívoco nesta construção teórica, com reflexos importantes para toda a ciência econômica.

Daly e Farley (2004), visando superar esta questão, sugerem uma adaptação, onde o fluxo que definiria a economia seja linear, com entradas de matérias ou energia de baixa entropia e há saídas de resíduos ou rejeitos de elevada entropia (DALY; FARLEY, 2004).

²¹ Uma máquina capaz de produzir trabalho ininterruptamente, sem consumo de qualquer combustível, ou um reciclador perfeito. Tal processo contradiz a segunda lei da termodinâmica. A chamada lei da entropia diz que a energia ou matéria no universo movem-se inexoravelmente para um estado menos ordenado. Um fluxo entrópico é simplesmente um fluxo no qual a matéria ou energia se tornam menos úteis (DALY; FARLEY, 2004) após um determinado processamento. Esse movimento é irreversível e unidirecional (CECHIN, 2008).

Ainda, essas entradas e saídas ocorrem em relação a um sistema maior que sustenta todo o subsistema econômico - o sistema ambiental.

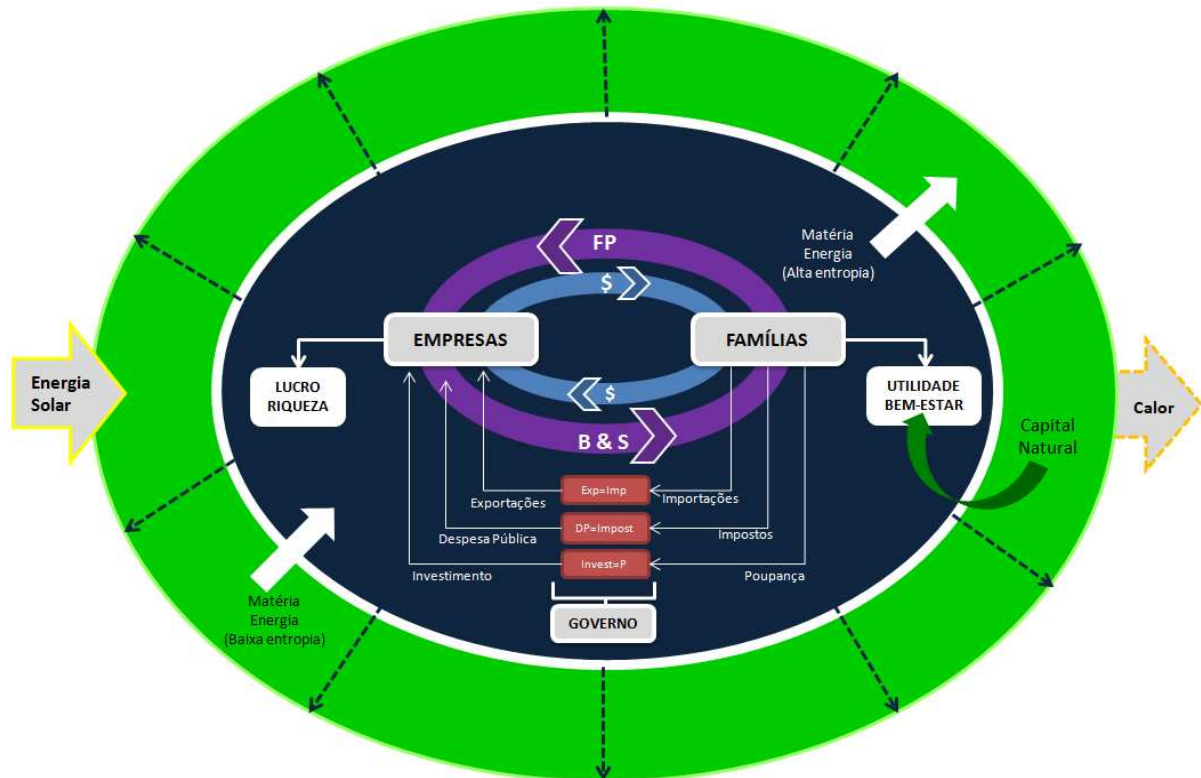


Figura 5 - Sistema ambiental e seu subsistema econômico
Fonte: Adaptado de Daly e Farley (2004) e Daly (1996).

Mudar o diagrama de fluxo circular para fluxo linear implica necessariamente na consideração de outras variáveis externas ao sistema econômico. A consideração e a correta hierarquização do sistema ambiental, neste sentido, importam. Isto porque, se o sistema econômico for o todo, realmente não há nenhum grande problema aparente com a lógica do crescimento ilimitado como prega a doutrina econômica ortodoxa. Porém, se o sistema econômico é um subsistema de um sistema maior, regido por regras mais abrangentes²², o cenário e os resultados são completamente alterados.

Outra forma de avaliar a importância da abordagem sistêmica no contexto do presente trabalho são os próprios modelos de crescimento econômico. Coelho (2010) afirma que muito do debate entre teorias alternativas de crescimento está relacionado à

²² Estas questões serão tratadas com maior detalhe nos capítulos 3 e 4.

classificação do caráter exógeno ou endógeno das variáveis envolvidas no processo, e que a consideração dessas variáveis na explicação do crescimento não é fixa ou fechada, variando entre as épocas e teorias de crescimento. Rodrik (2003 apud SNOWDON; VANE, 2005), neste sentido, divide as variáveis do crescimento econômico a partir de três classes: os endógenos, constituídos pelos fatores de produção propriamente ditos²³ (a), os fatores semi-endógenos²⁴ (b), e os fatores exógenos. Coelho (2010) adota a mesma taxonomia para as fontes do crescimento, embora localize as variáveis de maneira distinta²⁵.

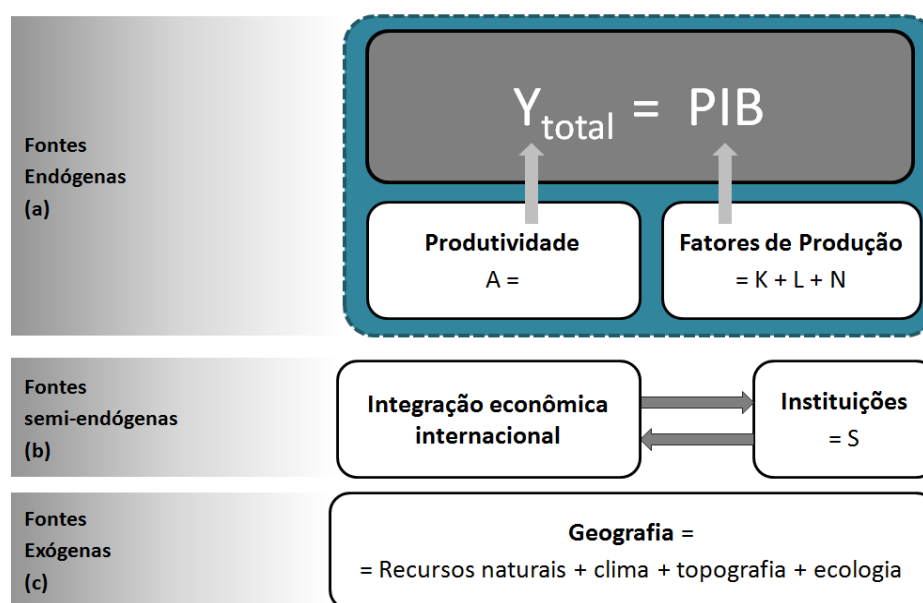


Figura 6 - Taxonomia das fontes fundamentais de crescimento econômico
Fonte: Adaptado de Snowdon e Vane (2005)

Do ponto de vista dos modelos, assumir que uma variável é exógena é retirá-la do sistema considerado. As variáveis exógenas, dentro dos modelos de crescimento, embora aceitas, não estão inseridas nos exercícios de modelagem e não são explicadas pelo modelo (SNOWDON; VANE, 2005). Beinhocker (2006), ao comentar de maneira crítica esta questão, afirma que a teoria tradicional classifica tudo o que é interessante na economia, ou aquilo que altera os estados de equilíbrio, como exógeno.

²³ Tipicamente o capital físico (K), o trabalho (L) e os insumos (N) e a produtividade dos fatores (A) (SNOWDON; VANE, 2005). Há aqui uma inconsistência teórica importante, uma vez que os recursos naturais, considerados como insumos endógenos, são reclassificados como exógenos quando considerados sob a ótica do que os autores chamam de geografia. Há uma clara distinção em relação à consideração da variável ambiental dentro do processo produtivo.

²⁴ Abarca variáveis que variam pouco ao longo do tempo ou que, a depender da teoria de crescimento, podem ser flexibilizadas para exógenas ou endógenas (COELHO, 2010).

²⁵ Para Coelho (2010), a produtividade, a força de trabalho e o capital humano são classificados como variáveis semi-endógenas.

O esquema da síntese das taxonomias das fontes do crescimento apresentado pela figura 6 possibilita, neste sentido, algumas reflexões interessantes, considerando todo o exposto até o momento. A variável chamada de geografia²⁶ é a única considerada, sem sombra de dúvida, exógena ao sistema macroeconômico.

A abordagem sistêmica das relações entre o ambiente e o sistema econômico, bem como as reflexões sobre suas relações hierárquicas entre o sistema principal e seus subsistemas, dessa forma, possibilitam relativizar uma série de pressupostos oferecidos pela teoria econômica e considerados como dogmas inquestionáveis. Avançando, os próximos tópicos irão tecer considerações sobre os sistemas econômico e ecológico como sistemas complexos adaptativos.

1.2 Sistemas complexos adaptativos

Uma rápida análise das principais obras sobre o tema evidencia que definir sistemas complexos adaptativos não parece ser uma tarefa trivial. Muitos autores preferem iniciar suas considerações sobre o termo a partir de exemplos ou de propriedades comuns.

Mitchell (2009), após elencar uma série de exemplos – dentre eles o sistema econômico - delimita três principais características comuns a sistemas complexos: a) comportamento coletivo complexo, constituído por diversos agentes, guiados por regras relativamente simples e sem um controle central²⁷; b) Uso e produção de informações em

²⁶ Aquilo que os autores chamam de geografia, logicamente, está muito longe de abarcar toda a complexidade do sistema ambiental tratado pelo presente trabalho. Para os autores, a variável geográfica está relacionada a duas questões. A primeira ligada à produtividade de nações e regiões associadas à localização, aglomeração e tamanho. A segunda está pautada no impacto direto do clima, da distribuição de recursos naturais e da topografia, fatores estes que, segundo os autores, podem influenciar a saúde de uma população, a produtividade agrícola, os custos de transporte e difusão de informações e conhecimento (SNOWDON; VANE, 2005). É curioso e importante lembrar que os recursos naturais como insumos para o processo produtivo são considerados pelos autores como endógenos ao modelo.

²⁷ Sistemas em que o comportamento organizado surge sem um controle interno ou externo são também chamados de sistemas *auto-organizados* (MITCHELL, 2009).

relação aos ambientes internos e externos; c) Adaptação, ou uma mudança de comportamento dos agentes através de aprendizagem ou processos evolucionários.

Visando garantir mais precisão ao constructo, Mitchell (2009) refina o termo para sistemas complexos adaptativos, excluindo sistemas onde o fator adaptação não desempenha uma função importante, como o caso de rios turbulentos ou furacões.

Holland (1995 apud FOLKE, 2006) elencam quatro propriedades básicas de sistemas complexos adaptativos: a agregação, a não linearidade, a diversidade e os fluxos. O autor afirma que a não linearidade está relacionada à dependência do caminho²⁸, e às regras locais de interação que alteram o desenvolvimento e a evolução de um sistema. Ainda, a principal consequência da dependência do caminho é a existência de múltiplas bacias de atração e de múltiplos estados de estabilidade em um sistema (FOLKE, 2006).

Miller e Page (2007) partem de uma visão mais simples, a partir da relação entre agentes. Segundo os autores, em um primeiro e mais básico nível, o estudo de sistemas complexos parte da idéia da compreensão do comportamento de cada componente e como ocorrem suas relações mais primárias para então, entender o sistema como um todo.

Nesse contexto, Beinhocker (2006) relembra as origens da idéia de complexidade, com os primórdios dos estudos sobre sistemas de comportamento caótico, não periódico e irregular, principalmente através do chamado problema dos três corpos (ou n-corpos)²⁹ e os estudos originais de Poincaré sobre a estabilidade do sistema solar, que evidenciaram as dificuldades na interação de forças quando considerados mais de dois corpos (situação esta prevista e solucionada pela teoria newtoniana), além da sensibilidade às condições iniciais.

Beinhocker (2006), desta forma, inicia sua construção conceitual sintetizando um sistema complexo como um sistema constituído de muitos agentes que interagem dinamicamente e, a partir dessas interações na escala micro, apresentam padrões emergentes de comportamento na escala macro. Após, o autor avança para uma definição

²⁸ *Path-dependency.*

²⁹ *Three-body problem* ou *N-body problem*

de sistema complexo adaptativo como um sistema onde há interação e adaptação na relação entre os agentes e entre eles e o seu ambiente. Ainda, afirma que sistemas adaptativos complexos são uma subcategoria de sistemas abertos e longe do equilíbrio³⁰.

Mitchell (2009) propõe uma definição alternativa de sistemas complexos adaptativos como um sistema que exhibe comportamentos auto-organizados emergentes não triviais. A autora observa que a questão central do estudo de sistemas complexos adaptativos é entender como esse comportamento emergente acontece.

Beinhocker (2006), adicionalmente, afirma que, em razão dessas relações entre os agentes e a sua possibilidade de adaptação, previsões são quase impossíveis, mesmo no curto prazo.

Miller e Page (2007) e Page (2009) estabelecem quatro características fundamentais em sistemas complexos: a) a diversidade de entidades; b) a conexão entre as entidades, c) a interdependência entre as entidades ou a força entre as conexões e, d) a existência de adaptação, evolução ou aprendizado.

Essas características elencadas por Miller e Page (2007) e Page (2009) podem ocorrer em diferentes intensidades, em suas diferentes aplicações. É possível, por exemplo, pensar nessas características a partir de situações extremas. Em um pólo, é possível imaginar cenários onde não há diversidade de agentes, ou não há conexão entre eles, ou ainda, a força da conexão é constante, e não existe adaptação. Para essas condições, uma solução determinística bastaria para entender seu comportamento e realizar previsões. Num pólo oposto, onde todos os agentes são diferentes, e não há nenhum padrão na existência de conexões e suas intensidades, ou onde mudanças ocorrem de maneira instantânea e aleatória, não seguindo nenhuma regra de evolução ou adaptação evidente. Nessas

³⁰ Beinhocker (2006), citando John Holland, afirma que um sistema aberto em equilíbrio não é um sistema estável, mas um sistema morto. Tal definição não se confunde com a ideia de múltiplos estados de equilíbrios em sistemas dinâmicos, com diferentes níveis de estabilidade, conforme tratado no capítulo 3.

condições, o sistema apresenta-se mais próximo do caos onde, conhecendo com precisão as condições iniciais³¹, também poderia ser analisado através de regras determinísticas³².

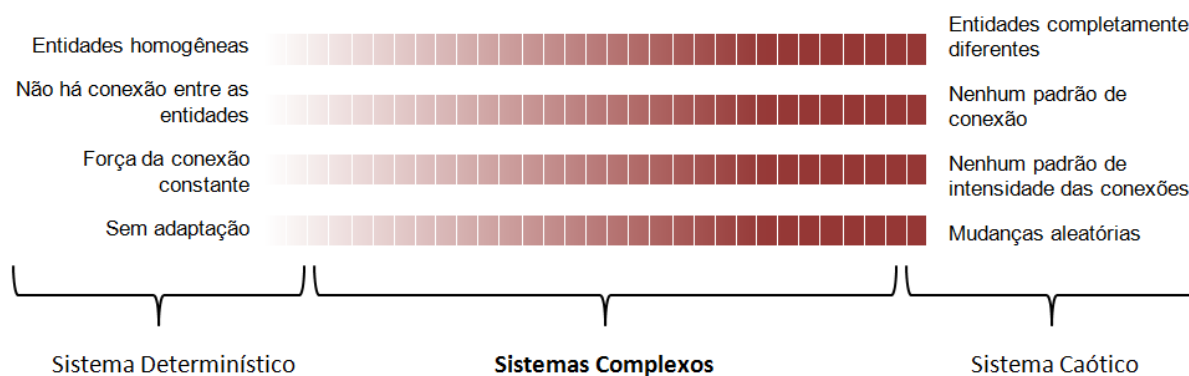


Figura 7 - Esquema posicionando os sistemas complexos entre os extremos.

Miller e Page (2007) afirmam, porém, que sistemas classificados como complexos frequentemente apresentam situações intermediárias³³ em relação a essas características, e que esses sistemas são os mais comuns na natureza (BEINHOCKER, 2006).

1.3 Sistemas Econômicos e Ecológicos como sistemas complexos

Considerando as características apresentadas, é possível afirmar com segurança que os sistemas econômicos e ecológicos estão inseridos entre os sistemas complexos adaptativos (COSTANZA *et al.*, 1993). Limburg *et al* (2002) afirmam que ambos os sistemas são inegavelmente complexos e compartilham muitas características, já que ambos são constituídos por redes complexas de componentes ligados por processos dinâmicos e ambos possuem componentes bióticos e abióticos interagindo intensamente.

³¹ Mitchell (2009) define sistemas caóticos como aqueles nos quais pequenas incertezas em relação às condições iniciais podem resultar em erros enormes de previsão no longo prazo, ou seja, há uma forte dependência e sensibilidade em relação às condições iniciais.

³² Silva, Ritter e Hamburger (2003) afirmam que sistemas caóticos são sistemas determinísticos, ou seja, podem ser entendidos através de equações diferenciais. As incertezas dos sistemas caóticos estão associadas à sua extrema sensibilidade às condições iniciais.

³³ Miller e Page (2007) afirmam que o tema central de seu trabalho é justamente o “*Interest in Between*”, que será retomado no capítulo 4.

Beinhocker (2006), retomando o *three-body problem* e a questão da diversidade de agentes, lembra que a economia real é um “6.4-billion-body problem”³⁴. Considerando o sistema econômico como um subsistema de um sistema maior - o ambiental, esse número adquire uma proporção virtualmente infinita.

Neste sentido Beinhocker (2006) afirma que o sistema econômico possui um enorme número de estoques e fluxos dinamicamente conectados em elaboradas redes com relações de *feedback* positivas e negativas, e que essas relações de *feedback* operam com atrasos e em diferentes escalas de tempo, além do sistema ser marcado por não linearidades.

A noção da emergência de padrões em economia não é inédita. Mitchell (2009) lembra que o próprio termo clássico cunhado por Adam Smith – *a mão invisível* do mercado, já denota a idéia da combinação de comportamentos individuais diversos, baseados em seus próprios interesses, produzindo um efeito emergente na escala macro que, no caso da teoria de Smith³⁵, levaria à produção de benefícios máximos para toda a sociedade.

Para Beinhocker (2006) a economia é um sistema evolucionário, que é uma classe de sistemas complexos adaptativos. Ambas as teorias – evolucionária e de sistemas complexos, fornecem uma radical mudança de perspectiva para questões econômicas importantes, inclusive em relação às soluções tradicionalmente propostas.

De uma maneira geral, Beinhocker (2006) distingue uma linha de pensamento, chamada por ele de “*economia da complexidade*”³⁶ da “*economia tradicional*”, através da consideração de cinco pontos básicos, conforme Quadro 1:

³⁴ Podemos atualizar a expressão de Beinhocker para “7-billion-body problem”.

³⁵ Uma breve discussão sobre a teoria de crescimento de Smith será apresentada no Capítulo 2.

³⁶ *Complexity economics*.

Quadro 1 - As Cinco Ideias que distinguem a Economia Tradicional da "Economia da Complexidade"

	Economia Tradicional	Economia da Complexidade
Dinâmica	Fechado, estático, sistemas lineares em equilíbrio.	Aberto, dinâmico, sistemas não lineares distante do equilíbrio.
Agentes	Modelados coletivamente; usam cálculos complexos dedutivos para a tomada de decisão; possuem informações completas/ não são sujeitos a erros e vieses e não possuem necessidade de adaptação (já são perfeitos).	Modelados individualmente; uso de regras indutivas para a tomada de decisão; possuem informação incompleta; são sujeitos a erros e vieses, aprendem e se adaptam através do tempo.
Redes	Agentes apenas interagem indiretamente por meio de mecanismos de mercado (leilões)	Modelado explicitamente com as relações entre os agentes individuais; redes de relacionamento mudam com o tempo.
Emergência	Micro e macroeconomia continuam como disciplinas separadas	Sem distinção entre a micro e a macroeconomia; macro padrões emergem como resultado de comportamentos e interações no nível micro
Evolução	Nenhum mecanismo para a endogeneização do aparecimento de inovação ou crescimento em ordem e complexidade.	Os processos evolucionários de diferenciação, seleção e amplificação proporcionam inovação ao sistema que é responsável pelo crescimento em ordem e complexidade.

Fonte: Beinhocker (2006). Tradução do autor.

Arthur (1999) considera que a “economia da complexidade” representa um abandono das analogias mecânicas³⁷ do equilíbrio que orientaram a ciência econômica desde a revolução marginalista³⁸, assim como a incorporação de *insights* da termodinâmica de sistemas abertos e da teoria da evolução.

Essa mudança de paradigma foi reforçada por Waldrop (1992), sintetizando o pensamento de Arthur já em 1979, através da confrontação daquilo que ele - Arthur (1979) - classificava como "*Old Economics*" e "*New Economics*", conforme Quadro 2.

³⁷ Para maior aprofundamento na questão das relações metafóricas entre a física e a econômica, ver Mirowski (1989).

³⁸ Cechin e Veiga (2010) afirmam que uma exceção a este paradigma atomista e mecanicista que orientou o pensamento econômico do pós-guerra é a visão de Georgescu-Roegen, principalmente ao apontar os limites da analogia com a física mecânica e a crítica ao processo econômico em equilíbrio, assim como pelas suas inclinações às metáforas biológicas, antecipando as abordagens da complexidade e da economia evolucionária.

Quadro 2 - Diferenciação dos paradigmas da Velha Economia e da Nova Economia, de acordo com o pensamento de Arthur.

<i>Old Economics</i>	<i>New Economics</i>
Retornos decrescentes	Reconhece retornos crescentes
Baseada na física do século XIX (equilíbrio, estabilidade, dinâmica determinística)	Baseada na biologia (estrutura, padrões, auto-organização, ciclo de vida)
Pessoas idênticas	Foco na vida individual. As pessoas são independentes e diferentes
A perfeição - ou nirvana, só pode ser atingido se não há externalidades e todos possuem habilidades iguais	Externalidades e diferenças são as forças motrizes. Não existe nirvana. Os sistemas estão em constante expansão
Os objetos de estudo são as quantidades e os preços	Os objetos de estudo são os padrões e as possibilidades
Não há dinâmica real visto que tudo está em equilíbrio	A economia deve ser considerada constantemente na fronteira do tempo. Ela corre para frente, as estruturas estão em constante interação, deterioração e alteração
Vê os problemas como estruturalmente simples	Vê os problemas como inerentemente complexo
Economia como " <i>soft physics</i> "	Economia como ciência de alta complexidade

Fonte: (WALDROP, 1992). Tradução do autor.

No outro extremo, o ambiente, considerado a partir da ótica dos sistemas, é complexo por definição. Todos os requisitos definidos por Page (2009) são cumpridos, mesmo em uma análise mais superficial. A própria gestão dos recursos naturais é eminentemente complexa. Mitchell (2009) recorda os cenários definidos por Garret Hardin na chamada *Tragédia dos Comuns*³⁹, sua similaridade com o chamado Dilema do Prisioneiro⁴⁰ e com os problemas do aquecimento global, por exemplo. Ainda, Kay (1994) afirma que existe uma relação muito próxima entre sistemas complexos, termodinâmica⁴¹ e ecologia.

³⁹ HARDIN, G. The Tragedy of the Commons. Science, 162,1243-1248, 1968.

⁴⁰ O artigo de Lima e Rua (2003) explora bem a associação do Dilema do Prisioneiro e a questão ambiental.

⁴¹ Questões relacionadas à termodinâmica e entropia serão abordadas no Capítulo 4.

O próprio conceito de capital natural⁴² reforça que sua adequada e plena consideração não pode ser viabilizada fora da esfera da complexidade, em razão da sua essência multidimensional. Além disso, o entendimento dos sistemas econômicos como constituídos de seres vivos e inseridos em ecossistemas⁴³ (HODGSON, 1993 apud CECHIN; VEIGA, 2010), com fluxos e trocas dinâmicas e permanentes, exige uma abordagem evolucionária e/ou complexa.

Retornando à relação com os sistemas socioeconômicos, a própria questão do avanço tecnológico, da emergência e difusão da inovação, e suas relações com o ambiente interno (a interação entre as firmas) e externo (políticas públicas, cenário socioeconômico e ambiental) reforçam a necessidade de uma visão mais abrangente e sistêmica na análise das mudanças econômicas e ambientais (CECHIN; VEIGA, 2010).

Nesse sentido, Prugh *et al.* (1999) afirma que os humanos e seus sistemas – de conhecimento, cultural, tecnológico e de artefatos coevoluem⁴⁴ simetricamente com os sistemas naturais. Essa profunda interdependência revela duas implicações significativas no contexto da sustentabilidade – foco central deste trabalho.

A primeira é que evolução não significa necessariamente progresso. A coevolução contínua entre os sistemas ambientais e socioeconômicos estão relacionadas simplesmente a respostas e adaptações a sistemas em constante mudança. A segunda é a certeza da imprevisibilidade irreduzível das relações entre os sistemas. A habilidade humana para antecipar e controlar qualquer alteração nessa relação é inerentemente limitada, pela própria característica dos mesmos (PRUGH *et al.*, 1999). Com base nestas questões que será desenvolvido o próximo tópico deste capítulo.

Por fim, outra propriedade muito importante em sistemas complexos, e fundamental no estudo das relações entre os sistemas econômico e ambiental, é a questão da transição

⁴² O conceito de capital natural é apresentado e detalhadamente discutido no capítulo 3, tópico 3.1.

⁴³ Termo originalmente proposto por Tansley em 1935, que pode ser definido como a associação entre seres e as relações destes com o meio. Possuem como características fundamentais: i) limites (espaço-temporais); ii) fatores e componentes que se influenciam mutuamente; iii) sistemas abertos, com entradas e saídas; e iv) capacidade de resistir e/ou adaptar-se a distúrbios. Propriedades emergentes e redes tróficas são algumas formas de analisar ecossistemas (ANGELINI, 1999).

⁴⁴ Uma discussão sobre o conceito de *coevolução* pode ser encontrada em Norgaard (1994) e Costanza et al. (1997).

crítica de fase, intimamente relacionada à existência de múltiplos estados de equilíbrio de um determinado sistema (SCHEFFER, 2009).

Scheffer (2009), neste sentido, define transição crítica como o regime de ruptura radical do estado de equilíbrio em um sistema, quando ultrapassado um limiar de estabilidade. Em sua obra, Scheffer (2009) elenca uma série de estudos de caso onde tais dinâmicas estão presentes, passando desde ecossistemas aquáticos (lagos e oceanos), ecossistemas terrestres, regulação climática, evolução de espécies, além de sistemas humanos (nível celular, comportamental e social)⁴⁵.

Tais fenômenos são regidos essencialmente por relações de *feedback* entre os diversos elementos e processos de um sistema. Miller e Page (2007) afirmam que as relações de *feedback* possuem a potencialidade de alterar profundamente as dinâmicas de um dado sistema. Em sistemas com relações de *feedback* negativo, as mudanças são rapidamente incorporadas e o sistema torna-se mais estável. Já em sistemas onde existem relações de *feedback* positivo, as mudanças são amplificadas, geralmente direcionando o sistema à instabilidade (MILLER; PAGE, 2007).

Todas as relações de *feedback* são fatores que alteram a força da estabilidade, porém, o acúmulo dessas mudanças externas ou perturbações no sistema, com pequenos efeitos na estabilidade, reduzem o tamanho da chamada bacia de atração do equilíbrio, diminuindo a resiliência do sistema, tornando o equilíbrio mais frágil. Em outras palavras, mesmo que determinados eventos não permitam observar alterações importantes no sistema, seu acúmulo afeta a vulnerabilidade do ambiente (SCHEFFER, 2009).

⁴⁵ Tais fenômenos, bem como a questão dos múltiplos estados de equilíbrio, serão tratados em maior detalhe no Capítulo 3.

1.4 Por que simular?

Romper as barreiras do reducionismo cartesiano e do determinismo - que inviabilizam a análise de fenômenos complexos e transdisciplinares como o objeto do presente estudo - pressupõe a construção de novos paradigmas metodológicos capazes de captar a ampla gama de questões descritas nos tópicos anteriores e viabilizar o entendimento de mecanismos e processos inerentes a tais sistemas.

Conforme visto, umas das características fundamentais de sistemas complexos é a relação com a variável tempo, ou seja, o objeto de análise são sistemas eminentemente dinâmicos. Ainda, estão presentes propriedades como a intensa inter-relação entre seus componentes, a questão da coevolução dos agentes envolvidos, além da notória dificuldade em realizar previsões em razão de mecanismos presentes neste tipo de sistema como relações de *feedback*, ruptura brusca no estado de equilíbrio (o que implica na existência de múltiplos estados de equilíbrio - estáveis e instáveis), diferentes faixas de resiliência e histerese⁴⁶.

Para cenários como estes, Miller e Page (2007), Page (2009) e Hartmann (1996) concordam que não há soluções determinísticas possíveis ou capazes de enfrentar todas as questões envolvidas. Consequentemente - e esta é uma das hipóteses defendidas por este trabalho - é possível afirmar com segurança que não há saída determinística viável para o pleno enfrentamento do problema da economia ecológica⁴⁷.

A modelagem, neste sentido, apresenta-se como um raro instrumento com potencial para a realização de análises e reflexões sobre as principais características mencionadas.

Modelo é uma representação intencional de algum sistema real (RAILSBACK; GRIMM, 2010). Ainda, Voinov (2008) define modelo como uma simplificação da realidade. O exercício da modelagem parte do princípio de que os sistemas reais são frequentemente muito

⁴⁶ Conceitos estes analisados em maior detalhe no capítulo 3.

⁴⁷ A contextualização e conceituação da chamada Economia Ecológica será objeto de análise no Capítulo 4. A questão o posicionamento dos problemas fundamentais da economia ecológica como complexos são objeto específico do tópico 4.3.

complexos ou se desenvolvem muito lentamente para serem analisados a partir de experimentos (RAILSBACK; GRIMM, 2010). Neste sentido, modelos são ferramentas que visam facilitar a compreensão de fenômenos observados em termos mais simples para a cognição humana, bem como podem também ser enquadrados como instrumentos de previsão (MITCHELL, 2009). Trivelato (2003) tece considerações importantes sobre o conceito de modelos:

Um modelo é a representação do conhecimento e a principal ferramenta para o estudo do comportamento de sistemas complexos. Modelar é o primeiro passo para a análise de um sistema de qualquer natureza e sob qualquer aspecto. Quando o modelo é uma representação válida de um sistema, informações significativas podem ser retiradas sobre sua dinâmica ou seu desempenho (TRIVELATO, 2003, p. 6).

Modelos são desenvolvidos e utilizados para resolver problemas, responder questões sobre um sistema ou uma classe de sistemas, para entender como coisas funcionam, explicar padrões que podem ser observados, e prever um comportamento em resposta a alguma mudança (RAILSBACK; GRIMM, 2010; HARTMANN, 1996).

Mitchell (2009) afirma que, no contexto da investigação de sistemas complexos, a exploração de modelos relativamente simples possibilita obter *insights* em relação a um problema específico, sem a necessidade de previsões detalhadas sobre um determinado sistema.

Esta característica é significativa no contexto do presente trabalho, principalmente quando resgatamos a imprevisibilidade tratada no tópico anterior. Mesmo que a questão da previsão esteja distante no contexto do problema ora abordado, em função da enormidade de variáveis envolvidas, a modelagem e a simulação de um sistema estilizado tem a potencialidade de embasar reflexões importantes do ponto de vista do problema estudado. Estas reflexões podem envolver a exploração e entendimento de mecanismos subjacentes a algum fenômeno mais complicado, além da possibilidade de exploração de efeitos de variações de algum parâmetro sobre um modelo simples (MITCHELL, 2009; HARTMANN, 1996).

Redhead (1980 apud HARTMANN, 1996) caracteriza um modelo como um conjunto de suposições sobre um determinado sistema. Hartmann (1996) complementa, afirmando que essas suposições podem ser orientadas por uma teoria geral, ou podem ser utilizadas apenas como descrições idealizadas de um objeto ou sistema em especial. O autor relembra que modelos podem ser categorizados como estáticos ou dinâmicos, sendo estes últimos aqueles relacionados com suposições sobre a evolução do sistema em um período de tempo, e estão intimamente associados a processos de simulação (HARTMANN, 1996).

A simulação - ou a modelagem de processos dinâmicos - segundo Hartmann (1996), permite reproduzir um processo através de outro processo. Processos, neste sentido, são entendidos como simplesmente uma sequência temporal de estados de um sistema.

Schriber (1974 apud FREITAS FILHO, 2009) explica que simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo limite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo. Banks (1998) conceitua simulação como a imitação de um processo ou um sistema baseado no mundo real durante um período de tempo. Freitas Filho (2009) afirma que a simulação permite compreender melhor quais as variáveis são as mais importantes em relação à performance e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema.

Uma subclasse dos modelos dinâmicos são os modelos baseados em agentes, cuja principal característica é a representação de componentes individuais de um sistema e seus comportamentos, descrevendo-os como entidades únicas e autônomas que interagem entre si e com o seu ambiente local. Ainda, agentes possuem comportamento adaptativo, ajustando suas regras baseadas em estados atuais próprios, de outros agentes e de seu ambiente (RAILSBACK; GRIMM, 2010).

Ainda de acordo com Railsback e Grimm (2010), a modelagem baseada em agentes pode ser compreendida como uma técnica que permite entender como as dinâmicas de sistemas biológicos, sociais e outros sistemas complexos surgem a partir de características e comportamentos dos agentes individuais, e como estes formam um sistema.

Este tipo de modelo permite a observação do fenômeno da *emergência*, ou a dinâmica que surge da interação e resposta de cada agente às mudanças de outros agentes e do ambiente (RAILSBACK; GRIMM, 2010). Gilbert (1996) afirma que a emergência deve ser entendida em termos de macro propriedades de um sistema e suas relações com as micro propriedades de seus componentes.

De uma maneira geral, a simulação em sistemas complexos baseada em agentes implica na aplicação de um modelo, baseado em regras de comportamento individuais essenciais, regras estas que influenciam tanto o ambiente quanto os próprios agentes e suas relações, variando para cada período de tempo. Questões como a intensidade das relações entre os componentes do sistema e a importância da variável tempo⁴⁸ são fatores que não podem ser incorporados por outra ferramenta de análise se não a simulação.

⁴⁸ Não apenas o tempo, mas toda a dinâmica de evolução. Conhecer e entender o caminho importa tanto quanto o tempo.

As intensas relações entre as dinâmicas econômicas e a realidade ambiental não podem mais ser consideradas como meras especulações, muito embora ainda sejam sistematicamente ignoradas pelo *mainstream* econômico. Harris e Goodwin (2003) elencam uma série de áreas⁴⁹ onde há fortes evidências da insustentabilidade⁵⁰ dessa relação.

Conforme apresentado na introdução do presente trabalho, autores como Daly (1991a) e Booth (1998) afirmam que o cerne dos problemas e conflitos dessa relação são os mecanismos macroeconômicos orientados para o crescimento, afirmação esta que contraria a visão convencional, que atribui tais questões a fenômenos de natureza microeconômica. Neste sentido, a análise do sistema econômico aqui apresentada será restrita apenas à questão do crescimento econômico, em razão do foco da presente dissertação.

Esse frágil relacionamento entre os sistemas macroeconômico e ambiental, historicamente, é desconsiderado pelos modelos de crescimento econômico desenvolvidos pelos principais teóricos do assunto. É importante, neste sentido, entender a trajetória de desenvolvimento desses modelos, visando encontrar e contextualizar as raízes dos pontos mais nevrálgicos e polêmicos, bem como sua relação com o sistema ambiental.

Desta forma, o presente capítulo será iniciado com a apresentação de um sucinto histórico dos modelos de crescimento econômico a partir das principais correntes e escolas econômicas⁵¹. Seguindo a ordem cronológica, o ponto de partida será a escola clássica⁵², passando para os principais expoentes da escola neoclássica, encerrando com a chamada abordagem evolucionária. Um parêntese, porém, será feito para introduzir o pensamento de

⁴⁹ Harris e Goodwin (2003) avaliam os temas “uso de energia e dependência de combustíveis fósseis”, “emissão de gases do efeito estufa e mudança climática”, “sistemas de transporte e uso automotivo”, “sistemas de alimentos e produtividade agrícola”, “águas, florestas e pesca” e “produtos químicos tóxicos e resíduos”.

⁵⁰ Insustentabilidade aqui apresentada se refere à inviabilidade de manutenção no tempo. A construção formal dos conceitos de sustentabilidade será objeto de tratamento do capítulo 4.

⁵¹ A escolha dos principais autores foi definida em razão de suas contribuições para a teoria do crescimento econômico. O objetivo do tópico é apenas apresentar as principais referências, sem entretanto, ter nenhuma intenção de esgotar a análise do assunto.

⁵² Optou-se pelo recorte da chamada escola clássica por meio da breve apresentação das linhas gerais do pensamento de Adam Smith, Thomas Malthus, David Ricardo e Stuart Mill.

Schumpeter, em razão de sua importância para o desenvolvimento das teorias do crescimento econômico. alguns dos principais precursores dos principais modelos de crescimento econômico, argumento este que visa justificar a ausência de importantes pensadores como Karl Marx e John Maynard Keynes no presente capítulo.

Na sequência, será apresentada uma reflexão sobre a questão da variável ambiental nos modelos de crescimento. O capítulo é encerrado com uma breve discussão sobre a questão do crescimento econômico e os conceitos de riqueza e prosperidade.

2.1 Teorias e modelos de crescimento econômico

A macroeconomia, como um ramo isolado da teoria econômica, tem sua fundação atribuída à publicação de "Teoria Geral do Emprego, do Juro e da Moeda" por John Maynard Keynes em 1936 (STIGLITZ; WALSH, 2003). É possível afirmar com alguma segurança que a Grande Depressão deflagrada pelo colapso das bolsas de valores em outubro de 1929 foi o grande indutor do pensamento sobre o papel dos governos na definição de políticas e programas econômicos (STIGLITZ; WALSH, 2003) e, conseqüentemente, está na raiz da chamada teoria macroeconômica.

A questão do crescimento, dentro da teoria macroeconômica, ocupa um papel central. Brue (2005) afirma que é especialmente a partir de 1945 que ocorre a grande expansão do conhecimento específico sobre crescimento e desenvolvimento econômico. Porém, autores clássicos como Adam Smith, Thomas R. Malthus, David Ricardo, além dos fisiocratas franceses, considerados como os fundadores da ciência econômica como campo de estudo autônomo⁵³ (CARVALHO, 2010), já tinham a questão do crescimento econômico de longo prazo como um dos temas fundamentais de suas investigações (CORAZZA, 2005b), mesmo sem fazer menção específica ao termo (PAVARINA, 2003).

⁵³ A obra *A Riqueza das Nações*, de Adam Smith, publicada em 1776, é considerada como o marco para o reconhecimento da ciência econômica (STIGLITZ; WALSH, 2003).

Considerando a base conceitual apresentada na introdução deste trabalho, é razoável pensar na estrutura do processo de crescimento econômico a partir da função de produção. Mueller (2005) afirma que toda a análise do processo produtivo realizado pela teoria econômica está apoiada no conceito de função de produção, que pode ser definida como "uma lista de todos os processos ótimos⁵⁴ pelos quais uma dada quantidade de um produto pode ser obtida de cada combinação possível de fatores" (MUELLER, 2005, p. 691-692).

Basicamente, qualquer função de produção relaciona a taxa de produção da economia em um determinado período de tempo, com as quantidades dos diversos fatores que condicionam a produtividade (ADELMAN, 1972). Neste sentido, a função de produção representa a quantidade máxima de produto possível de ser obtida com cada combinação dos fatores de produção (ADELMAN, 1972).

Passaremos a seguir a uma breve revisão histórica sobre as principais visões, teorias e modelos de crescimento econômico, sempre com foco na questão dos fatores de produção⁵⁵.

2.1.1 Escola Clássica

Desde o *Tableau Economique* de François Quesnay⁵⁶ (1694-1774) já era possível identificar uma preocupação com o objeto agregado da economia, embora ainda revestido de um tom medieval (BRUE, 2005). Criado em 1758 e revisado em 1766, o *Tableau Economique* pode ser considerado como o prenúncio para a análise da renda nacional, além de mostrar pela primeira vez o fluxo circular de bens e dinheiro em uma economia ideal e

⁵⁴ Mueller (2005) explica que, via de regra, muitas combinações de fatores permitem chegar a essa quantidade de produção, mas apenas processos ótimos são de interesse da análise econômica, ou seja, processos que levem à produção máxima possível de se obter de uma determinada combinação de fatores de produção.

⁵⁵ De acordo com Sandroni (2001), pode-se entender *fatores de produção* como os elementos indispensáveis ao processo produtivo. O termo, neste sentido, será utilizado apenas como uma forma de identificar os principais fatores considerados como fontes do processo de crescimento econômico em cada período histórico.

⁵⁶ Considerado o fundador e líder da escola fisiocrática (BRUE, 2005).

livremente competitiva (BRUE, 2005). Hunt (2005) afirma que o *Tableau Economique* é, basicamente, um modelo de uma economia que pressupõe que a produção ocorra em ciclos anuais e que tudo o que é produzido em um ano seja consumido naquele mesmo ano, ou seja, transformado em insumos necessários para a produção do ano seguinte.

O modelo apresentado no *Tableau Economique* revela uma economia baseada em dois setores de produção: a *classe produtiva*, ou os agricultores, e a *classe estéril*, ou os produtores de mercadorias industrializadas, com esses dois setores de produção articulados de forma interdependente, ou seja, o produto de um é o insumo necessário para o outro, com a necessidade da circulação contínua da moeda (HUNT, 2005).

O determinismo natural, ou a crença nas leis naturais que governam as atividades econômicas (DELUIZ; NOVICKI, 2004), é o principal pilar de sustentação das ideias da escola fisiocrática. Conforme os autores (op. cit), considerando o contexto feudal, o pensamento fisiocrático estava centrado na consideração de que somente a agricultura gera excedente ou riqueza. Neste sentido, o excedente era um dom da natureza (HUNT, 2005).

Com a ruptura do sistema feudalista, a superação do período transitório mercantilista, e a consequente consolidação do modo de produção capitalista, emergem as ideias de **Adam Smith** (1723-1790), que começa a delinear mais formalmente o que posteriormente seria chamado de uma teoria do desenvolvimento econômico.

Sua obra magna *An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations*, conhecida simplesmente como *A Riqueza das Nações*, Smith trata da criação e distribuição dos bens e serviços, do dinheiro, do papel das diversas classes sociais e do Estado, do comércio nos planos nacional e mundial, dos mercados, dos tributos, da política econômica, mas sempre com o foco na criação de riqueza (POSSAS, 2002).

Smith partia da premissa geral da divisão do trabalho e do acúmulo de capital como fatores primários para a produção de riqueza (POSSAS, 2002; BRUE, 2005). Era a divisão do trabalho que teria por objetivo gerar aumento na produtividade do trabalho, por meio da

introdução de produtos do desenvolvimento técnico⁵⁷, e a acumulação do capital ocorreria via expansão do mercado (BRUE, 2005; CARVALHO, 2010).

A divisão do trabalho, seguida da consequente especialização, traria benefícios para os capitalistas, através da ampliação da produtividade e dos lucros, mas também para os trabalhadores, por meio do aumento do valor dos salários, atrelados à maior demanda por trabalho (CARVALHO, 2010).

É a grande multiplicação das produções de todos os diversos ofícios - multiplicação esta decorrente da divisão do trabalho - que gera, em uma sociedade bem dirigida, aquela riqueza universal que se estende até as camadas mais baixas do povo. Cada trabalhador tem para vender uma grande quantidade do seu próprio trabalho, além daquela de que ele mesmo necessita; e, pelo fato de todos os outros trabalhadores estarem exatamente na mesma situação, pode ele trocar grande parte de seus próprios bens por uma grande quantidade, ou - o que é a mesma coisa - pelo preço de grande quantidade de bens desses outros. Fornece-lhes em abundância aquilo que carecem, e estes, por sua vez, com a mesma abundância, lhe fornecem aquilo que ele necessita; assim é que em todas as camadas da sociedade se difunde uma abundância geral de bens. (SMITH, 1996, p. 32)

De uma maneira geral, Smith acreditava que a alteração da organização social do trabalho, da produção de subsistência em produção para o mercado, ou em escala social, dependia não só da divisão do trabalho como também um número proporcional de trabalhadores produtivos⁵⁸, para a acumulação do capital em último termo (GREMAUD *et. al.*, 2003).

Hunt (2005) afirma que a teoria econômica de Smith era, acima de tudo, uma teoria normativa orientada para as políticas, com a preocupação principal de identificar as forças sociais e econômicas que mais promovessem o bem-estar humano que, pela definição de

⁵⁷ Smith, porém, não reconhecia que essas novas tecnologias poderiam provocar, num efeito oposto, a divisão do trabalho (BRUE, 2005).

⁵⁸ Para Smith, havia uma clara distinção entre trabalho produtivo e trabalho improdutivo. O primeiro pode ser definido como aquele que acumula trabalho em um bem tangível e acrescenta valor de mercado ao produto. Já o segundo é aquele investido em serviços oferecidos que não resultam em bens tangíveis disponíveis no mercado (BRUE, 2005).

Smith, dependia da quantidade do produto do trabalho anual e do número dos que deveriam consumi-lo.

A proposição mais famosa de Smith - *a mão invisível* - estava justamente baseada nessa questão da quantidade do produto de cada indivíduo, em um mercado livre, onde os atos egoístas dos indivíduos são indiretamente dirigidos para a maximização do bem-estar econômico (HUNT, 2005).

Todo indivíduo que emprega seu capital no fomento da atividade interna necessariamente procura com isso dirigir essa atividade de tal forma que sua produção tenha o máximo de valor possível. O produto da atividade é aquilo que esta acrescenta ao objeto ou às matérias-primas aos quais é aplicada. Na proporção em que o valor desse produto for grande ou pequeno, da mesma forma o serão os lucros do empregador. Mas se alguém emprega um capital para fomentar a atividade, assim o faz exclusivamente em função do lucro. (...) Já que cada indivíduo procura, na medida do possível, empregar seu capital em fomentar a atividade nacional e dirigir de tal forma essa atividade que seu produto tenha o máximo de valor possível, cada indivíduo necessariamente se esforça para aumentar ao máximo possível a renda anual da sociedade. Geralmente, na realidade, ele não tenciona promover o interesse público nem sabe até que ponto o está promovendo. Ao preferir fomentar a atividade do país e não de outros países, ele tem em vista apenas sua própria segurança; e orientando sua atividade de tal maneira que sua produção possa ser de maior valor, visa apenas a seu próprio ganho e, neste, como em muitos outros casos, é levado como que por uma mão invisível a promover um objetivo que não fazia parte de suas intenções. Aliás, nem sempre é pior para a sociedade que esse objetivo não faça parte das intenções do indivíduo. Ao perseguir seus próprios interesses, o indivíduo muitas vezes promove o interesse da sociedade muito mais eficazmente do que quando tenciona realmente promovê-lo (SMITH, 1996, p. 51-52).

Adelman (1972) lembra que a taxa de mudança das instituições e o incremento da terra por unidade de tempo não são importantes no modelo econômico de Smith, embora a variável institucional seja importante em termos de política econômica. Já para a questão dos recursos naturais, Smith nunca afirmou explicitamente que sua oferta fosse limitada.

Na escala macro e internacional, a lógica da divisão do trabalho também seria válida, ou seja, cada país deveria dedicar o maior volume de sua produção a segmentos mais

convenientes, de acordo com suas características e interesses, comercializando seu excedente na esfera internacional, propiciando diminuição de custos e aumento do bem-estar social (MAIA, 2004).

Essa sensação de otimismo associada à resolução dos problemas macroeconômicos a partir de ações, mesmo que egoístas, dos agentes econômicos individuais, não era compartilhada por **Thomas Robert Malthus** (1766-1834) (CARVALHO, 2010), cuja teoria foi desenvolvida no contexto dos efeitos sociais negativos da revolução industrial, principalmente a pobreza, a urbanização crescente e o desemprego (BRUE, 2005; CORAZZA, 2005b), e teve evidente influência na sua análise sobre o crescimento.

A teoria da população de Malthus parte de dois postulados básicos, conforme Corazza (2005b): a limitação da produção de alimentos e o crescimento populacional em taxas distintas⁵⁹. Tal hipótese estava pautada na sua teoria de rendimentos decrescentes na agricultura, que afirmava que as melhorias realizadas em uma quantidade fixa de terra forneceriam resultados cada vez menores (BRUE, 2005).

Há, portanto, para Malthus, uma limitação intransponível ao crescimento. A definição da economia como “uma luta competitiva da sociedade pela sobrevivência e uma constante disputa entre o crescimento populacional e a capacidade da humanidade em melhorar sua produtividade” (BEINHOCKER, 2006, p. 16), com uma previsão pessimista da derrota da humanidade nessa corrida, indica claramente sua crença na impossibilidade de um crescimento ilimitado.

Embora autor de teorias importantes para a explicação de problemas amplamente disseminados em sua época, sua linha de argumentação apresentava significativas imprecisões. Corazza (2005b) afirma que a teoria da população de Malthus consistia, sobretudo, numa tentativa de argumentação lógica, mas fundada em bases empíricas muito precárias⁶⁰. A mais significativa limitação das análises de Malthus foi ter subestimado

⁵⁹ Malthus afirma, em seu *A Summary View of the Principle of Population* (1830), que a população, quando não controlada, aumenta em progressão geométrica de tal natureza que ela dobra a cada 25 anos, enquanto os meios de subsistência crescem apenas numa progressão aritmética (BRUE, 2005; CORAZZA, 2005a).

⁶⁰ Corazza (2005a) lembra que a hipótese do não paralelismo entre as taxas de crescimento populacional de alimentos foi extrapolada a partir da observação do cenário dos Estados Unidos, onde havia maior abundância de alimentos e menos restrições aos casamentos, e registrou a duplicação da população em 25 anos. A partir

totalmente o ritmo e o impacto do progresso tecnológico e do acúmulo de capital (GREMAUD et. al., 2003; BRUE, 2005; PIMENTEL, 2007).

Já para **David Ricardo** (1772-1823), o emprego da análise marginal, sua apresentação da lei dos rendimentos decrescentes na agricultura e a ampliação do escopo da análise econômica para incluir a distribuição de renda são temas centrais e legaram importantes contribuições à ciência econômica (BRUE, 2005).

Ricardo considerava que o problema principal da então chamada Economia Política era explicar “a distribuição do produto nacional entre os proprietários de terra, os donos de capital e os trabalhadores, na forma de renda, lucro e salários, respectivamente⁶¹” (HOFFMANN, 2001, p.67).

Partindo principalmente das ideias de Adam Smith, Ricardo “substitui o tema da análise da acumulação de capital pela análise do problema da distribuição do produto social e como esta distribuição afeta a taxa de lucro e o crescimento econômico do país” (CORAZZA, 2005b, p. 10).

A terra como um fator de produção, é variável em qualidade⁶², mas tem oferta fixa. É baseado nesta premissa que Ricardo assume a questão da produtividade marginal decrescente, já que não só a produtividade marginal da própria terra, mas como também do capital e do trabalho diminuem quando é necessário buscar os recursos em regiões mais distantes e menos férteis, com a consequente queda nas taxas de lucro (ADELMAN, 1972; CORAZZA, 2005b). Neste sentido, o próprio desenvolvimento econômico provocaria um aumento da demanda por alimentos, reiniciando o ciclo, com a necessidade de cultivo de terras menos férteis e mais distantes, com custos sempre maiores (CORAZZA, 2005b).

dessa observação simples, Malthus conclui que, quando não controlada, a população cresce a uma taxa geométrica e que os alimentos nunca poderiam acompanhar esta taxa, considerando que a terra estava sujeita a rendimentos decrescentes. A própria previsão de crescimento populacional mostrou imprecisões visto que, embora tenha apresentado um aumento vertiginoso de cerca de 1 bilhão de pessoas em 1800 para 6 bilhões de pessoas em 2000, o crescimento foi muito menor do que a progressão geométrica de 25 anos (BRUE, 2005).

⁶¹ Problema esse hoje conhecido como "distribuição funcional da renda" (Hoffmann, 2001).

⁶² Ricardo, ao abordar essa questão, trata a qualidade da terra em termos de fertilidade e distância em relação aos centros consumidores (CORAZZA, 2005b).

Entretanto, assim como Malthus, algumas imprecisões fundamentais em Ricardo revelaram suas análises como incompletas ou mesmo equivocadas, principalmente em relação à desconsideração do avanço tecnológico ou à consideração da utilização simples da terra⁶³ (BRUE, 2005).

Por fim, ainda dentro da chamada escola clássica, é importante apresentar as linhas gerais⁶⁴ do pensamento de **Stuart Mill**. Desde sua obra *Principles of Political Economy*, Mill já considerava a questão da influência do progresso técnico sobre a produção - principalmente a agricultura - e ratificou a questão do fortalecimento das estruturas de mercado da agricultura como fundamentais para o crescimento econômico, em razão do barateamento dos alimentos, da redução dos salários nominais e do aumento dos lucros como um todo. Neste sentido, as inovações técnicas poderiam otimizar a força de trabalho e o uso da terra (SOUZA, 1999 apud SOUZA, 2009).

No contexto do presente trabalho, uma questão importante em Mill, conforme Veiga (2005) e Daly e Farley (2004), é a sua crença na condição estacionária do capital e da riqueza como positiva, na contramão da tendência geral, mesmo no contexto da escola clássica. O estado estacionário de Mill, neste sentido, estava relacionado à manutenção em níveis constantes⁶⁵ da população e dos estoques de capital físico. A questão da distribuição deveria ser priorizada em relação ao aumento de riqueza, esta última apenas admissível em países atrasados (VEIGA, 2005). Essa condição seria a ideal, pensando nos propósitos humanos últimos, com a possibilidade de maior disponibilidade para o lazer, para o cultivo de valores e das amenidades da vida. Neste sentido, a busca pelo crescimento econômico deveria ocorrer apenas no estágio inicial do progresso de um país ou região (VEIGA, 2005).

⁶³ Principalmente em relação à não consideração da concorrência entre outros possíveis usos.

⁶⁴ Apenas os temas com relação ao objeto do presente trabalho.

⁶⁵ Estoques constantes não implicam em um cenário estático, mas em um equilíbrio dinâmico (DALY; FARLEY, 2004).

2.1.2 Schumpeter

Embora autor de uma obra vasta, com contribuições em temas muito diversificados (LAPLANE, 1997), a principal questão a que se dedicou Joseph Alois Schumpeter foi a explicação do processo de desenvolvimento econômico (ADELMAN, 1972). Porém, Costa⁶⁶ (1997) afirma que, sem dúvida, Schumpeter distinguiu claramente a diferença entre crescimento e desenvolvimento. Schumpeter está, notadamente, mais preocupado com o segundo tema.

Nem será designado aqui como um processo de desenvolvimento o mero crescimento econômico, demonstrado pelo aumento da população e da riqueza. Por isso não suscita nenhum fenômeno qualitativamente novo, mas apenas processos de adaptação da mesma espécie que as mudanças nos dados naturais. (SCHUMPETER, 1997, p. 74).

É possível afirmar com tranquilidade que o ponto de maior destaque para a compreensão da dinâmica econômica em Schumpeter é entender o papel central da inovação e do progresso técnico (BRUE, 2005; ROSENBERG, 2006).

Neste sentido, o núcleo da obra de Schumpeter está na "constituição de uma visão original da dinâmica econômica capitalista, na qual a ruptura das rotinas estabelecidas e a transformação das estruturas existentes assumem um papel de destaque" (LAPLANE, 1997, p. 60). Ainda, é a partir do resultado das iniciativas dos agentes econômicos individuais que ocorre a reorganização da atividade econômica, com impactos mais amplos. Neste sentido, a inovação é o motor do processo de mudança e, desta forma, de desenvolvimento (LAPLANE, 1997).

Schumpeter define inovação como mudanças nos métodos de oferta de mercadorias e a abertura de novos mercados. Inovação, para Schumpeter, é uma invenção de sucesso, utilizada ou aplicada a processos industriais⁶⁷ (BRUE, 2005). É preciso lembrar

⁶⁶ Rubens Vaz da Costa, na introdução de SCHUMPETER, J. A. Teoria do Desenvolvimento Econômico: uma investigação sobre Lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico. Coleção Os Economistas. Ed. Nova Cultura, 1997.

⁶⁷ Neste sentido, a inovação abarcaria processos e produtos. Rosenberg (2006), amparado por Kuznets (1972)

que Schumpeter entendia que as inovações não ocorrem de forma contínua, mas em grupos, a partir da criação de um clima favorável, onde a imitação⁶⁸ ocorre de maneira mais intensa (BRUE, 2005).

Brue (2005) observa que, para Schumpeter, sem inovação, a vida econômica atingiria um equilíbrio estático, e seu fluxo circular seguiria pelos mesmos canais, ano após ano, e o acúmulo de riquezas cessaria. A inovação, neste sentido, é a causa última da instabilidade nas economias capitalistas, e são exatamente estas instabilidades, as rupturas, desequilíbrios e as discontinuidades, as marcas do desenvolvimento capitalista (LAPLANE, 1997).

Ainda, Nelson e Winter (2005) reforçam a importância em Schumpeter da ênfase do progresso técnico como indutor de cisões, discontinuidades ou rupturas em relação ao passado, representada por sua hipótese da *destruição criativa*, que parte da premissa que uma inovação empresarial, simultaneamente, cria novos produtos e/ou métodos de produção e destrói forças de mercado existentes baseadas no modo anterior⁶⁹.

Uma função de produção, para Schumpeter, poderia ser descrita em duas etapas. A primeira relacionada ao componente do *crescimento econômico* e outra relacionada ao componente do *desenvolvimento*. A primeira poderia ser descrita como $Y = f(L, N)$, com Y representando a produção, L, representando o trabalho e N a terra, conforme segue:

(...) se subimos na hierarquia dos bens, chegamos finalmente aos que são, para os nossos objetivos, os últimos elementos da produção. Não é necessária maior argumentação para dizer que esses últimos elementos são o trabalho e as dádivas da natureza ou “terra”, os serviços do trabalho e da

lembra que essa classificação entre mudança de processo ou de produto depende muito da perspectiva adotada, uma vez que uma mudança de processo envolve tipicamente equipamentos ou maquinários novos, que são inovações de produto do ponto de vista das empresas que os produzem.

⁶⁸ Schumpeter acreditava que as mudanças tecnológicas ocorriam via inovação num primeiro momento, seguido da imitação pelos concorrentes.

⁶⁹ Nelson e Winter (2005), avaliando este tema, observam que essa destruição, na economia real, pode ocorrer como a perda de participação no mercado da empresa afetada (em alguns casos pode levar à falência), ou como incentivos à mudança tecnológica para adaptação às novas exigências do mercado. Neste sentido, seria possível afirmar que cenários de forte concorrência reforçam a necessidade de revisão das estratégias da empresa e, no sentido oposto, cenários de monopólio ou de oligopólios muito acentuados agem contra o impulso de inovação (NELSON; WINTER, 2005), validando as ideias de Schumpeter.

terra. Todos os outros bens “consistem” pelo menos em um destes e a maioria em ambos. Podemos converter todos os bens em “terra e trabalho”, no sentido de que podemos conceber todos os bens como feixes dos serviços do trabalho e da terra. (SCHUMPETER, 1997, p. 35).

Adelman (1972), entretanto, ao considerar a mesma componente do crescimento da função de produção de Schumpeter, considera também o fator K, alterando a equação para $Y = f(K, N, L)$, com K representando o conceito schumpeteriano de "os meios de produção produzidos", e não a noção de capital. Porém, o próprio Schumpeter esclarece a razão para não considerá-los um fator de produção independente:

Mas os produtos remanescentes, ou seja, os “meios de produção produzidos” são, por um lado, apenas a encarnação dos dois bens de produção originais, por outro lado, bens de consumo “potenciais”, ou melhor, partes de bens de consumo potenciais. Até agora não encontramos nenhuma razão, e ficará claro mais tarde que não há nenhuma razão, para que devêssemos ver neles um fator de produção independente. Nós “os convertemos em trabalho e terra”. Também podemos transformar os bens de consumo e, de modo inverso, conceber os fatores produtivos originais como bens de consumo em potencial. Ambas as perspectivas, todavia, são aplicáveis apenas aos meios de produção produzidos; pois não têm existência em separado. (Schumpeter, 1997, p. 35).

Adelman (1972) e Moricochi e Gonçalves (1994) afirmam que a complementação da função, considerando também os componentes do desenvolvimento, produziria a equação geral $Y = f(K, N, L, S, U)$, com S e U representando as principais forças que condicionam a produtividade, ou seja, S representaria a taxa de mudança da tecnologia e U, a taxa de mudança do ambiente sociocultural, responsáveis pelos saltos econômicos (MORICOCI; GONÇALVES, 1994).

Pessoa (2003) lembra que é importante salientar as diferenças essenciais entre o núcleo básico da teoria schumpeteriana e a teoria ortodoxa neoclássica, visto que as empresas, visando o lucro, são motivadas a inovar ou imitar, mas o cálculo cuidadoso da escolha dentro do conjunto de possibilidades de produção não é considerado como fundamental. Muito pelo contrário, a própria existência de um ambiente competitivo entre as empresas garante um sistema dinâmico e incerto.

Fica evidente que Schumpeter rompe com algumas visões importantes no pensamento ortodoxo econômico sobre o tema. Questões como a descontinuidade dos processos de mudança e a interação entre os agentes econômicos, principalmente por meio do mecanismo da *destruição criativa*, e a concepção do mercado como um processo dinâmico, impossibilitam a utilização plena de grande parte das premissas neoclássicas, em especial os dois pilares básicos: a racionalidade dos agentes e o equilíbrio, como será visto a seguir.

Ainda, é importante salientar a força do pensamento de Schumpeter, principalmente nos anos 80, como fonte de inspiração para a construção de um paradigma teórico alternativo - as chamadas correntes neo-schumpeterianas ou evolucionista (LAPLANE, 1997), que serão objeto de avaliação mais próxima no tópico 2.1.4.

2.1.3 Harrod-Domar, Solow e a Escola Neoclássica

As primeiras décadas do século XX, marcadas pelo período pós Primeira Guerra Mundial e pela Grande Depressão, redirecionaram o foco das análises econômicas para questões mais relacionadas aos fenômenos de curto prazo, principalmente os desequilíbrios da balança de pagamentos, a inflação e o desemprego (NELSON, 2006). A atenção apenas foi restabelecida após a Segunda Guerra Mundial, principalmente em razão da disponibilidade de novos dados do Produto Nacional, que tornou possível a compreensão em termos quantitativos do dramático crescimento na produção por trabalhador e na renda *per capita* (NELSON, 2006).

Neste sentido, e já no contexto das ideias da escola keynesiana, o modelo de crescimento de Harrod-Domar⁷⁰ pode ser considerado como o primeiro modelo específico elaborado para análise do crescimento econômico (BRESSER-PEREIRA, 1975). Em especial, a

⁷⁰ Adaptação das contribuições de Sir Roy F. Harrod (1939) e de Evsey Domar (1946) à teoria do crescimento (SIMONSEN; CYSNE, 1995).

obra *An Essay in Dynamic Theory*, de 1939, é considerada inaugural da chamada nova teoria do crescimento econômico (AMARAL; SERRA; ESTEVÃO, 2008; PESSOA, 2003).

De uma maneira geral, o modelo de Harrod-Domar parte de alguns pressupostos simplificadores importantes que conduziam a uma economia fechada, como a produção na fronteira das possibilidades, uma propensão marginal a poupar constante e ausência de progresso tecnológico (SOUSA, 2009).

Ambas as teorias, de Roy F. Harrod e de Evsey Domar, observavam que gastos com investimentos líquidos aumentam a renda agregada imediatamente, e ao mesmo tempo, expandem a produção potencial de períodos futuros (ENGLAND, 2000). Neste sentido, o ponto de partida do modelo é o equilíbrio de curto prazo entre poupança e investimento. O aumento do rendimento nacional só é possível através de um aumento no investimento. (NAZARETH; GUTIEREZ, 1975).

O processo de crescimento no modelo de Harrod-Domar é eminentemente instável, pois existe apenas uma taxa de crescimento de investimentos e da renda que assegura o equilíbrio, e não há nenhum mecanismo automático que garanta o crescimento dessas taxas (BRESSER-PEREIRA, 1975).

Diversas críticas são direcionadas às teorias de Harrod e de Domar pelos seus sucessores neoclássicos, desde a instabilidade do processo, passando pela exclusão da substitutibilidade de fatores de produção no curto prazo (BRESSER-PEREIRA, 1975), até a inadequação a economias subdesenvolvidas ou em vias de desenvolvimento (SOUSA, 2009).

Em resposta ao modelo de Harrod-Domar, em 1956 e 1957, Robert M. Solow publica sua influente análise sobre o crescimento econômico⁷¹. O modelo de Solow é tido como a referência básica e ponto de partida para quase todas as análises de crescimento (ROMER, 2006; SNOWDON; VANE, 2005).

⁷¹ SOLOW, R. A Contribution to the Theory of Economic Growth. *Quarterly Journal of Economics*, 70, 65-94. 1956 e SOLOW, R. Technical Change and the Aggregate Production Function. *Review of Economics and Statistics*, 39, 312-320. 1957.

Porém, faz-se necessário abrir um parêntese aqui para tratar, mesmo que brevemente, do pensamento neoclássico e seus impactos nas teorias de crescimento que se seguem a ela, nela incluída o próprio modelo de Solow.

Oriunda do pensamento marginalista, a escola neoclássica, inaugurada na década de 1870 por diversos autores em diversos países, teve por pioneiros nomes como Hermann Heinrich Gossen, na Alemanha; Carl Menger, na Áustria; Léon Walras, na Suíça; Stanley Jevons e Alfred Marshall, na Inglaterra (PRADO, 2001). Prado (2001) afirma que todos esses autores construíram suas análises a partir da construção de um “indivíduo genérico isento de relações sociais, que busca atender ao seu próprio interesse” (op. cit, p. 11). Gremaud *et al.* (2006) afirmam que a estruturação da escola neoclássica, porém, foi consagrada a partir do princípio básico da racionalidade dos agentes econômicos, representado pelo conceito de individualismo metodológico⁷².

A chamada síntese neoclássica⁷³, cuja origem pode ser atribuída à Hicks⁷⁴, que tentava reconciliar a macroeconomia keynesiana e a microeconomia ortodoxa (TOBIN, 1987 apud FERREIRA, 2003), é comumente apresentada como um modelo com três equações que representam o equilíbrio de cada um dos mercados: de bens, da moeda e do trabalho, além de uma função de produção agregada (FERREIRA, 2003). Depois da segunda Guerra Mundial, a síntese neoclássica tornou-se praticamente um consenso entre economistas e formuladores de políticas econômicas e afirmou-se como hegemônica (CECHIN, 2008; TEIXEIRA, 2003).

⁷² Individualismo metodológico, conforme Dow (1985, apud AMAZONAS, 1994), em um conceito mais estrito, está relacionado ao chamado *reducionismo*, ou *atomismo*, cujo sentido está atrelado à “redução das proposições às suas menores partes constitutivas para que se possa obter um conjunto de axiomas que sejam o máximo *auto-evidentes*, com o objetivo de, a partir das quais, todas as proposições possam ser derivadas por meio da dedução”. Para o autor (op. cit.), no caso da economia, “os resultados derivam de axiomas sobre o comportamento do indivíduo, apesar dos axiomas poderem ser aplicados aos lares ou firmas”. Amazonas (1994) esclarece que, neste sentido, o individualismo metodológico é “entendido interativamente aos referenciais de utilidade e equilíbrio”, onde “não há atribuição de determinações teóricas a instâncias que não se reduzam à lógica dos agentes individuais”.

⁷³ Termo cunhado inicialmente por Samuelson em 1955. (SAMUELSON, P. *Economics*. New York: McGraw-Hill, 1955), que tinha como objetivo a conciliação entre uma realidade macroeconômica em que havia a possibilidade de desemprego involuntário (supondo rigidez de salários nominais) e o aparato microeconômico de equilíbrio geral walrasiano (FERREIRA, 2003).

⁷⁴ Ferreira (2003) afirma que o ponto de partida para a construção da síntese neoclássica foi o artigo “Mr. Keynes and the Classics: a suggested interpretation”, escrito em 1937.

Nelson e Winter (2005), fazendo referência a essa corrente hegemônica, preferem chamá-la de ortodoxa, e relembram sua descendência de uma linhagem do pensamento econômico que parte de Adam Smith e Ricardo, através de Mill, Marshall e Walras. Para melhor delimitar o que eles chamam de pensamento ortodoxo, os autores (op. cit.) fazem menção aos conteúdos dos livros-texto mais utilizados em cursos de graduação em economia, enfatizando que tal classificação se refere à teoria econômica vigente e amplamente aceita.

Beinhocker (2006) usa a denominação “economia tradicional” para fazer menção à linha de pensamento oriunda da escola de Chicago⁷⁵, principalmente a partir da aplicação de técnicas neoclássicas microeconômicas à macroeconomia.

Independente da denominação, essa corrente hegemônica possui claramente, ao menos, dois grandes pilares básicos: a racionalidade dos agentes e o equilíbrio (NELSON; WINTER, 2005; BEINHOCKER, 2006). Amazonas (1994) observa essa corrente por meio de um trinômio interdependente - equilíbrio / maximização da utilidade / individualismo metodológico.

Nelson e Winter (2005) afirmam que, partindo da análise da teoria das firmas, o comportamento maximizador - ou o modelo da racionalidade perfeita - é visto como uma regra fundamental. Tal axioma implica uma série de outros pressupostos, como informação perfeita entre os agentes (não há incertezas nos processos de tomada de decisão), além do comportamento baseado apenas nos resultados das decisões econômicas, sem considerar todas as interações com outros agentes do sistema (BEINHOCKER, 2006).

Beinhocker (2006), tratando de maneira caricatural essa premissa, afirma que o modelo baseado na racionalidade perfeita dos agentes, parte da analogia de “um mundo incrivelmente simples com pessoas inacreditavelmente inteligentes” (op. cit, p. 51).

A própria manifestação do equilíbrio ocorreria como um resultado dessa premissa. As relações entre indivíduos auto-interessados e com processos de tomada de decisão baseados na racionalidade perfeita levaria a economia ao equilíbrio, num cenário em que

⁷⁵ Representada por economistas como Milton Friedman e Robert Lucas (BEINHOCKER, 2006; BRUE, 2005).

todos estariam maximizando sua utilidade e, baseado nessa idéia, todas as forças que agem no sistema se cancelariam e o sistema atingiria o equilíbrio (CECHIN, 2008).

As relações microeconômicas, base da formação do pensamento econômico vigente, são construídas a partir de uma visão estática comparativa, ou seja, sempre são confrontadas duas ou mais posições de equilíbrio, sem qualquer preocupação com o que possa ter ocorrido durante o período entre a passagem da situação inicial para a final, desconsiderando os ajustamentos entre as situações e a extensão do período de tempo em si (GREMAUD *et al.*, 2006).

Ainda em relação ao equilíbrio, Beinhocker (2006) afirma contundentemente que a maioria dos modelos econômicos tradicionais não considera a variável tempo⁷⁶. No mesmo sentido, considerar o crescimento como algo inerente ao sistema macroeconômico e, ao mesmo tempo, manter a noção de equilíbrio, parece ser uma contradição intransponível (BEINHOCKER, 2006).

Solow (1956), entretanto, transpôs essa aparente contradição no que ele chamou *balanced growth*, parte importante de sua prestigiada teoria do crescimento econômico. A saída encontrada por Solow foi a consideração da questão da substitutibilidade entre os fatores de produção como a chave para vencer essa aparente incoerência.

Fechando o parêntese e retornando ao modelo de Solow, é evidente que sua premissa mais importante, e que contrapunha Harrod-Domar já na sua concepção, é a hipótese neoclássica de que “a economia se ajusta internamente para obter crescimento equilibrado estável” (BRUE, 2005).

Outros contrapontos fundamentais são as críticas à excessiva ênfase na acumulação de capital típica do modelo de Harrod-Domar (PESSOA, 2003), além da própria questão do retorno da premissa da substitutibilidade entre os fatores de produção, excluída do modelo de Harrod-Domar, de forma que as quantidades de trabalho e capital possam ser sempre

⁷⁶ Beinhocker (2006), numa crítica explícita à esta questão, assegura que a economia é um fenômeno altamente dinâmico e, por definição, é impossível combinar a noção de equilíbrio, nos moldes adotados pela teoria neoclássica, com sistemas dinâmicos complexos.

combinadas para garantir o pleno emprego, ou seja, é sempre possível substituir fisicamente um fator pelo outro no processo produtivo.

Para tal, o modelo demanda que algumas condições sejam atendidas, como a existência de concorrência perfeita e a produção de um produto único, que tanto pode ser aplicado em investimento como em consumo (PESSOA, 2003).

Em Solow, o aumento do capital por trabalhador é o motor do crescimento da produtividade, porém, à medida que essa relação aumenta, a produtividade marginal do capital diminui. No limite, a relação capital/trabalho tende a uma constante e é estabelecido o equilíbrio. Desta forma, no longo prazo, não há crescimento (PESSOA, 2003).

Ainda conforme Pessoa (2003), a saída encontrada por Solow para a viabilização do crescimento dentro de seu modelo foi a inserção de um parâmetro exógeno, um fator residual, que ele chamou de progresso técnico. Com essa nova variável, mesmo que o crescimento de equilíbrio tenha sido atingido, o produto pode continuar a crescer em relação à oferta de fatores, se houver progresso técnico. Desta forma, esse resíduo representava nada menos do que a produtividade total dos fatores (PESSOA, 2003).

Como essa nova variável é exógena, o progresso técnico tende a ser visto como um bem público⁷⁷ e, neste sentido, sua disponibilidade e contribuição é a mesma para todos os países⁷⁸ (PESSOA, 2003).

O *insight* de Solow sobre o progresso técnico, mesmo que ainda não explicado, descortina uma ampla possibilidade de investigações. Marinho e Bittencourt (2007) afirmam que grandes esforços de pesquisa foram direcionados no sentido de introduzir na função de produção fatores que pudessem reduzir o resíduo de Solow. Autores mais recentes como Romer (1986)⁷⁹ e (1990)⁸⁰, Lucas (1988)⁸¹; Grossman e Helpman (1991)⁸², Aghion e Howitt

⁷⁷ De acordo com Mankiw (2001), bens públicos são aqueles não excludentes e não rivais, ou seja, não se pode impedir ou limitar o acesso ao recurso (não excludente) e a sua utilização por uma pessoa não inviabiliza a utilização por outros (não rival).

⁷⁸ O que, de acordo com Pessoa (2003), representa uma simplificação totalmente irreal.

⁷⁹ ROMER, P. Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 94, p. 1002-1037, 1986.

⁸⁰ ROMER, P. M. Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*, Vol. 98(5), pp. 571-102. 1990.

⁸¹ LUCAS, R. E. On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, v22, p. 3-42, 1988.

(1992)⁸³ e Jones (1995)⁸⁴ ampliam as investigações do progresso técnico como motor primário e endógeno do processo de crescimento (PESSOA, 2003).

Ainda, em 1974⁸⁵, Solow realiza uma releitura em seu modelo padrão de crescimento com a incorporação dos recursos naturais exauríveis na função de produção. A função de produção, neste sentido, é expressa como $Y = f(K, L) R^h$, com R representando os recursos naturais exauríveis e h um coeficiente que pode variar de 0 a 1, visando simular as variações no estoque do recurso.

Solow (1974) conclui seu estudo afirmando que essa incorporação no modelo não é significativa do ponto de vista dos resultados, já que a elasticidade de substituição⁸⁶ entre os fatores de produção não é menor que 1 e, desta forma, não é imprescindível ao modelo.

The second main conclusion is that the introduction of exhaustible resources into this sort of optimization model leads to interest results - some of which have been sketched - but to no great reversal of basic principles. This conclusion depends on the presumption that the elasticity of substitution between natural resources and labor-and-capital-goods is no less than unity - which would certainly be the educated guess at the moment. The finite pool of resources (I have excluded full recycling) should be used up optimally according to the general rules that govern the optimal use of reproducible assets. In particular, earlier generations are entitled to draw down the pool (optimally, of course!) so long as they add (optimally, of course!) to the stock of reproducible capital. (SOLOW, 1974, p. 41).

⁸² GROSSMAN, G; HELPMAN, E. Innovation and Growth in the Global Economy. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1991.

⁸³ AGHION, P. E P. HOWITT. A Model of Growth Through Creative Destruction. *Econometrica*, Vol. (2), pp. 323-51. 1992.

⁸⁴ JONES, C. I. R&D Based Models of Economic Growth. *Journal of Political Economy*, Vol. 103(4), pp. 759-784. 1995.

⁸⁵ SOLOW, R. Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *Review of Studies Economis*, v. 41, p. 29-45, 1975.

⁸⁶ A discussão sobre a substitutibilidade entre os fatores de produção, um dos pontos centrais nas discussões da sustentabilidade, será retomada no capítulo 4, mais especificamente no tópico 4.3.

2.1.4 Abordagem evolucionista

Radicalmente oposta ao pensamento neoclássico, a chamada abordagem evolucionária, em economia, tem suas origens atribuídas à Veblen que, já em 1898 defendeu, em seu artigo, a tese da economia como uma ciência evolucionária⁸⁷. Segundo Beinhocker (2006), muitos anos depois e, ao longo de décadas, economistas como Schumpeter, Hayek, Nelson e Winter investigaram a relação entre a economia e as teorias evolucionárias.

A teoria evolucionária, de partida, abandona uma série de pressupostos tidos como essenciais ao pensamento econômico tradicional, e as teorias schumpeterianas tem um papel fundamental nesse descolamento. Conforme visto anteriormente, existem diferenças fundamentais entre o núcleo da teoria schumpeteriana e a teoria neoclássica que podem ser reduzidas à negação da racionalidade perfeita dos agentes e do equilíbrio.

Seguindo essa lógica, a escola evolucionária nega, conforme Pessoa (2003), três aspectos essenciais dos pressupostos neoclássicos. Em suas palavras:

Em primeiro lugar, o progresso técnico não é determinado exogenamente, como em Solow (1956, 1957), mas deve ser tratado como uma variável endógena no processo de desenvolvimento econômico. Em segundo lugar, discordam do pressuposto que os factores de produção individuais possam ser separados, e sustentam pelo contrário, que existe um elevado grau de interdependência. Finalmente, consideram que o crescimento e o dinamismo econômico são determinados por processos de descoberta e aprendizagem, e não pelos resultados da alocação de recursos. (PESSOA, 2003, p. 6).

Ainda, para Pessoa (2003), na teoria evolucionária, as empresas operam, sempre, com um conhecimento imperfeito, limitado e variável do mercado ao qual está inserida. Neste sentido, não é possível pensar em funções para a maximização dos resultados, apenas em rotinas e regras de comportamento mínimas, que são adaptadas ao longo do tempo.

⁸⁷ VEBLEN, T. Why is economics not an evolutionary science? Reprinted (1998) in Cambridge Journal of Economics 1998, 22, 403-414.

Mais do que isso, o ambiente econômico possui, claramente, um elemento de irreversibilidade, isto é, a evolução do ambiente econômico é o resultado da dinâmica de progresso técnico, e não pode ser determinada previamente (PESSOA, 2003).

Para Beinhocker (2006), a moderna teoria evolucionária, extrapolando e mesmo evitando as analogias ou relações metafóricas com o contexto biológico, está pautada em questões mais abrangentes. Neste sentido, a evolução é considerada como um algoritmo, definida como um fenômeno universal, ou seja, possui certas leis gerais que podem ser aplicadas em vários contextos. Esse algoritmo evolutivo, segundo Beinhocker (2006), se dá através de processos de diferenciação, de amplificação e de seleção, com o mercado como avaliador final do *fitness*, ou aptidão, do agente. São esses mecanismos que, articulados de forma dinâmica, possibilitam o surgimento de inovações, que são a chave para o processo de criação de riqueza.

Diretamente inspirados nas contribuições de Schumpeter, Nelson e Winter (1973)⁸⁸ e (1974)⁸⁹, podem ser considerados como os pioneiros em relação à proposição de modelos baseados em uma teoria de progresso técnico endógeno, chamada por eles de evolucionária, onde as empresas são os atores chaves. Nelson e Winter, na construção dessa teoria, centram foco nos pontos mais fracos da teoria das firmas: o processo de surgimento e evolução tecnológica das firmas.

Ratificando a questão da negação de muitos dogmas utilizados pela teoria neoclássica, Nelson e Winter (2005) rejeitam principalmente a função de produção global, o espaço de escolhas bem definido e a racionalidade baseada em escolhas maximizadoras. Conforme os autores:

Em vez disso [*do cálculo maximizador das empresas*], nossas firmas são modeladas simplesmente como tendo, a qualquer tempo dado, certas capacidades e regras de decisão. Essas capacidades e regras se modificam ao longo do tempo, como resultado de esforços deliberados para a superação de problemas e eventos aleatórios. Ao longo do tempo, o análogo econômico da seleção natural opera à medida que o mercado

⁸⁸ Nelson, R. R; Winter, S. Toward an Evolutionary Theory of Economic Capabilities. American Economic Review, Vol. 63, pp. 440-9. 1973.

⁸⁹ Nelson, R. R; Winter S. Neoclassical vs Evolutionary Theories of Economic Growth: Critique and Prospects. Economic Journal, Vol. 84, pp. 886--905. 1974

determina quais firmas são lucrativas e quais não o são, tendendo a separar as segundas (NELSON e WINTER, 2005, p 19).

Como a função de produção e todos os outros padrões de comportamento regulares e previsíveis são abandonados, deixam de fazer sentido questões como a substituição de fatores de produção, tão discutida por Solow e pelos neoclássicos (PESSOA, 2003).

Basicamente, o modelo NW⁹⁰ consiste num mercado simulado envolvendo certo número de firmas, todas produzindo o mesmo produto homogêneo e empregando trabalho e capital físico em sua produção. Cada firma é caracterizada, em cada período, por uma técnica de produção e seu estoque de capital. A mudança tecnológica ocorre fundamentalmente através de mecanismos de busca⁹¹ e seleção (NELSON; WINTER, 2005).

A endogeneização do processo de mudança tecnológica das empresas, para Nelson e Winter, se dá por duas vias: a imitação ou a inovação. Há sempre uma avaliação individual de cada agente em relação a algumas decisões, que envolvem riscos e potencial de lucros, sempre com vistas à fronteira tecnológica emergente no período.

A abordagem proposta por Nelson e Winter apenas pôde ser viabilizada com o acesso a modelos de simulação, que possibilitam explorar os efeitos agregados do comportamento individual das empresas e as interações entre elas (PESSOA, 2003).

Pessoa (2003) lembra que, em razão dessa característica – a simulação, os modelos NW não deram origem a nenhum fluxo significativo de investigação empírica. Neste sentido, algumas críticas foram lançadas sobre os modelos, focando principalmente em sua “fraqueza empírica”. Pessoa (2003) recorda que Arrow⁹² (1995) crê que a abordagem evolucionária deve ser vista mais como um ponto de vista do que como uma teoria.

Entretanto, é indiscutível que a abordagem proposta por Nelson e Winter representa um avanço em relação à teoria microeconômica das firmas. A simples questão da

⁹⁰ NW – Nelson e Winter.

⁹¹ Por busca, os autores entendem a procura local de tecnologias mais eficientes que a sua, como primeiro passo para o processo de mudança tecnológica via imitação (NELSON E WINTER, 2005).

⁹² ARROW, K. J. Viewpoint. Science, Vol. 267, p. 1617. 1995

heterogeneidade dos agentes e sua ênfase na evolução dos mesmos, marcadamente dinâmica (PESSOA, 2003), são pressupostos significativamente mais realistas e interessantes do que os propostos pela teoria até então desenvolvida.

Pessoa (2003), complementarmente, observa que a abordagem evolucionária não foi a única alternativa à teoria neoclássica da produção. Segundo o autor, Brian Arthur (1983)⁹³ e Paul David (1985⁹⁴ e 1986⁹⁵) propuseram a teoria do progresso tecnológico como dependente da trajetória, ou *path dependent*, no qual a escolha atual das técnicas presentes são profundamente influenciadas por decisões passadas. (PESSOA, 2003).

Porém, argumentos contrários dizem que essa ligação temporal apenas se aplica às tecnologias caracterizadas por rendimentos crescentes à escala, e que em indústrias com rendimentos constantes ou decrescentes à escala, a verificação da ligação histórica não está claramente demonstrada (PESSOA, 2003).

Pessoa (2003) afirma que existem temas em comum entre as abordagens evolucionária e *path dependent*, como se vê:

Um tema comum às abordagens do progresso técnico [...] é o desacordo com o pressuposto, característico dos modelos de crescimento neoclássicos, de que uma função de produção está disponível para todos os países independentemente das dotações em recursos naturais, capital físico, capital humano e instituições. A experiência mostra que as assimetrias entre empresas e entre países em dotações de recursos, e capacidades científicas e tecnológicas, não são fáceis de ultrapassar, pois, para além de outras razões, as tecnologias, que se podem tornar as fontes mais dinâmicas do crescimento, têm muitas vezes localizações específicas. (PESSOA, 2003, p 122).

Ainda, Pessoa (2003) observa que Dosi (1997) produziu uma tentativa de ligar as abordagens, baseada essencialmente nos comportamentos micro dos agentes, e nunca no estabelecimento de pressupostos baseados num princípio abstrato. A abordagem *path*

⁹³ ARTHUR, W. B. On Competing Technologies and Historical Small Events: The Dynamics of Choice Under Increasing Returns. International Institute for Applied Systems Analysis Paper WP-83-90, Laxenburg, Austria. 1983.

⁹⁴ DAVID, P. A. Clio and the Economics of QWERTY. American Economic Review, Vol. 75(2), pp. 332-7. 1985.

⁹⁵ DAVID, P. A. Understanding the Economics of QWERTY: The Necessity of History. In William N. Parker (ed.), Economic History and the Modern Economist, New York: Basil Blackwell. 1986.

dependent é introduzida com a consideração da cumulatividade do progresso técnico. Neste sentido, “não basta observar o seu estado atual, é necessário considerar o caminho que percorreu.” (PESSOA, 2003).

Por fim, o modelo proposto por Dosi (1997) descarta o pressuposto da informação perfeita e completa. Desta maneira, os agentes tornam-se heterogêneos, como consequência da compreensão e de aprendizagens imperfeitas, mesmo quando enfrentam idênticas informações e oportunidades.

Os fenômenos agregados, ou regularidades, são explicados como propriedades emergentes, ou o resultado coletivo das interações e de processos de aprendizagem heterogêneos (PESSOA, 2003). Logicamente, desconsideram a visão de equilíbrio neoclássica.

2.2 A variável ambiental nos modelos de crescimento

Como verificado no item 2.1, nos primórdios da teoria do crescimento econômico, principalmente através da visão dos fisiocratas e da escola clássica, os recursos naturais, em particular a terra, eram considerados como um dos principais fatores de produção.

Amaral, Serra e Estevão (2008) lembram inclusive que o significado etimológico da palavra fisiocracia é “governo da natureza”. Contextualizando essa definição, a agricultura era a principal atividade econômica e a tecnologia disponível limitava significativamente a ampliação da produtividade.

Dos clássicos, é importante destacar Malthus, com sua teoria da população, como um precursor de estudos sobre a capacidade de suporte do ambiente em relação ao crescimento. Para ele o excesso de população, quando relacionado com as capacidades naturais, era uma causa independente de pobreza (DALY e FARLEY, 2004).

Já para Marx, há uma negação veemente da importância da natureza no funcionamento da economia e na criação de valor. Para Marx, a idéia de que a natureza comporta escassez era uma abominação, já que toda a pobreza era resultante de relações sociais injustas, ou da exploração de classes (DALY e FARLEY, 2004).

Amazonas (1994) aborda a visão de Marx:

(...) A teoria marxiana do valor-trabalho, identificando na força de trabalho a fonte única de criação de valor e, portanto de geração de excedente econômico, exclui a possibilidade de haver um valor inerente aos recursos da natureza. Tendo o materialismo histórico como método, Marx procura refutar a idéia de um “naturalismo” nas relações econômicas, mostrando ao contrário que estas seriam determinadas historicamente. Com isso, o sistema marxiano promove uma visão na qual o capital, no capitalismo plenamente constituído, se subordina apenas a restrições postas historicamente por ele próprio em seu processo de acumulação, não sendo mais limitado por outros fatores, como a natureza, mas sim subordinando estes à sua lógica. Em outras palavras, limitações postas pela natureza, como encontradas nas idéias ricardianas e malthusianas sobre os limites da terra à produção de alimentos, seriam superadas no processo de acumulação de capital, o qual alavancando as forças produtivas promove as condições materiais para superar tais restrições e, portanto subordinar a natureza. Deste modo, o sistema marxiano se permite trabalhar com a idéia de inexauribilidade dos recursos naturais. (AMAZONAS, 1994, p. 02)

Neste sentido, Amaral, Serra e Estevão (2008) afirmam categoricamente, reforçando o pensamento econômico vigente que, “passados 250 anos desde o desenvolvimento das teorias fisiocratas é necessário constatar que os recursos naturais, por si só, não são nem condição necessária nem suficiente de crescimento econômico”⁹⁶.

A subordinação da variável ambiental dentro dos modelos de crescimento econômico foi consolidada, principalmente, pela teoria neoclássica. O modelo neoclássico de Solow, usualmente expresso pela função⁹⁷ $Y = F(K, L, t)$, evidencia essa lógica. A *terra*, ou a variável ambiental, embora teoricamente contemplada, é entendida como desprezível e

⁹⁶ Entretanto, os autores tomam cuidado em lembrar que, embora não represente condição para o crescimento, o esgotamento dos recursos naturais pode impor alguns condicionantes ou mesmo limitar severamente o crescimento (Amaral; Serra; Estevão, 2008).

⁹⁷ Onde K é o input de capital, L é o trabalho e t é o tempo, introduzido para refletir o progresso tecnológico.

perfeitamente substituível pelo capital produzido⁹⁸, mediada pela inovação tecnológica contínua.

England (2000) afirma que, na década de 1970, Stiglitz⁹⁹ concordava plenamente com essas premissas. Seu modelo estava baseado na proposição de uma função de produção agregada com trabalho, bens de capital e recursos naturais como substitutos na produção e, desta forma, deixava implícito que a escassez de recursos naturais poderia ser compensada pelo progresso técnico.

Gómez-Baggethun *et al.* (2010) e Nunes (2010) apresentam uma sistematização geral da relação entre a evolução do pensamento econômico e a consideração da variável ambiental até os neoclássicos.

Quadro 3 - Relações entre a variável ambiental e as escolas de pensamento econômico.

Período	Escola econômica	Concepção do ambiente dentro do processo econômico	Relação entre valor e natureza
Sec. XVII-XVIII	Escola Pré-Clássica	Terra e trabalho são bens complementares	A terra é necessária para a criação de valor. É a única fonte de excedente
	Fisiocratas		
Sec. XIX	Escola Clássica	A terra é um fator de produção que gera renda	Valor de troca derivado do trabalho. Natureza provedora de valores de uso
Sec. XX	Escola Neoclássica	A terra é desconsiderada como fator de produção	A terra pode ser substituída por capital e pode ser monetizada

Fonte: Adaptado de Nunes (2010) e Gómez-Baggethun (2010).

Os modelos de crescimento pautados na teoria evolucionária, da mesma forma, não citam a variável ambiental. Como o foco do problema analisado pelos teóricos evolucionários é a mudança tecnológica como indutora do crescimento econômico, os modelos não apresentam preocupações com o *input* de matéria e energia para a viabilização do sistema produtivo, reproduzindo a lógica do otimismo tecnológico transversal ao pensamento econômico como um todo.

⁹⁸ A terra, em Solow, é considerada como ofertada em uma quantidade fixa com depreciação desprezível e, portanto, normalizada para 1 (HANSEN, 1999).

⁹⁹ STIGLITZ, J. Growth with exhaustible natural resources: efficient and optimal growth paths. *Rev. Econ. Studies*, 123–137. 1974.

Para Nelson e Winter (2006), o fluxo e a oferta de insumos são tidos como constante. Dosi (1988) toca brevemente neste assunto quanto fala em relação às demandas de mercado e as respostas tecnológicas¹⁰⁰, através do seguinte exemplo:

Por exemplo, o número de formas de fabricar polímeros a partir de combustíveis fósseis, bem como suas intensidades de insumos, está longe de ilimitado, independentemente dos preços dos insumos. Mesmo a substituição entre diferentes combustíveis (*e.g.*, petróleo *versus* carvão) frequentemente apresentam grandes problemas técnicos. Certamente, as mudanças de mercado podem estimular a busca por novos produtos e por novas “formas de fazer as coisas”. Sugiro, entretanto, que os fatores ambientais serão bem-sucedidos em mudar radicalmente as direções e os procedimentos do progresso técnico apenas *se e quando* forem capazes de promover a emergência de novos paradigmas (por exemplo, no caso anterior, novos materiais que substituam o plástico, processos de bioengenharia que produzam insumos alternativos aos hidrocarbonados fósseis). (DOSI, 1988, p.22)

De novo, está presente a crença no otimismo tecnológico como elemento chave nas relações entre o crescimento econômico e a variável ambiental.

No mesmo sentido, Barro e Sala-i-Martin (1995) nem ao mesmo citam as variáveis terra, energia, matérias-primas ou poluição em suas pesquisas sobre modelagem para o crescimento contemporâneo (ENGLAND, 2000).

For them [Barro e Sala-i-Martin (1995)], produced capital goods and human skills constitute the entire aggregate stock of capital. Macroeconomic activity apparently draws upon boundless sources of natural resources and bottomless sinks for waste products, thereby eliminating the need for an explicit discussion of economic growth within a natural world. (ENGLAND, 2000, p. 426).

Mais recentemente, economistas como Aghion e Howitt (1998) que, embora reconheçam a poluição e a depleção de recursos naturais como questões a considerar, trazem de forma muito clara a premissa de que a acumulação de “capital intelectual” pode solucionar possíveis restrições biofísicas para as atividades econômicas e assim, permitiriam um crescimento indefinido (ENGLAND, 2000).

¹⁰⁰ *Market pull versus technology push*, nas palavras de Dosi (1988).

Embora a idéia da consideração das variáveis ambientais como parte importante da avaliação macroeconômica, historicamente não encontre respaldo dentro do *mainstream* econômico, algumas novas correntes teóricas surgiram. A economia ambiental e, posteriormente, a economia ecológica, são duas vertentes que tratam da forma mais incisiva da relação entre os sistemas econômico e ambiental.

Ambas consideram que a natureza deve ser tratada, em suas relações com o sistema econômico, como uma forma de capital – o capital natural. As duas correntes, porém, diferem radicalmente nas considerações de como o capital natural deve ser tratado dentro do sistema produtivo. Tais temas serão objeto de análise mais detalhada nos capítulos 3 e 4.

2.3 Crescimento Econômico, Riqueza e Prosperidade

Considerando todo o apresentado nos tópicos anteriores deste capítulo, é possível pensar em duas questões que emergem da discussão: o que pode ser considerado como riqueza? e qual sua relação com os processos de crescimento e desenvolvimento econômico? Estas perguntas provocam uma série de desdobramentos, dentre eles, a questão do processo de crescimento econômico e sua relação direta com o bem-estar e os valores envolvidos em cada momento histórico.

Tradicionalmente, conforme discutido anteriormente, a atenção na questão da produção de riqueza tem sido mantida sobre os capitais produzidos (WORLD BANK, 2005) e suas relações com o agregado de toda a economia. Praticamente todas as teorias e modelos se concentram apenas nas dinâmicas associadas à ampliação do produto agregado. A intensidade dessa vinculação pode ser constatada na simples avaliação da força do indicador de desenvolvimento econômico padrão – o PIB.

Porém, desde *A Riqueza das Nações*, Smith já mostrava que o conceito de riqueza não é fixo, e que o valor de algo depende da disposição a pagar por ele em um determinado momento, conforme lembrado por Beinhocker (2006).

Segundo World Bank (2005), a riqueza real deve ser medida através da consideração dos estoques de capital produzido, capital natural e do capital intangível, este último relacionado ao amálgama do capital humano, das instituições e dos mecanismos de governança, além de outros fatores de difícil valoração. De acordo com a publicação (op. cit), o capital intangível representa a maior porcentagem da riqueza mundial. A contabilização precisa da riqueza, considerando não apenas o capital produzido como indicador, pode alterar significativamente o valor atribuído à riqueza gerada.

Desta forma, é possível afirmar que o processo de crescimento econômico está baseado apenas na variação do capital produzido, e não considera a amplitude do conceito de riqueza, visto que as outras formas de capitais são historicamente consideradas como exógenas ou, quando consideradas, as abordagens não permitem o entendimento de toda a complexidade inerente à suas dimensões.

Pensando em corrigir os desvios consolidados pelo cálculo do crescimento a partir do PIB, Dowbor (2009), propõe o conceito de *produtividade sistêmica*, que levaria em consideração todos os custos indiretos externalizados para a sociedade, ou seja, um indicador que explicita o resultado econômico em termos de qualidade de vida, de progresso social real.

Jackson (2009) afirma que a busca pela prosperidade deve ser mais bem posicionada em relação ao processo de crescimento econômico e de criação de riqueza. Comentando sobre a relativização da importância do processo de criação de riqueza, Jackson (2009) afirma que riqueza também não é sinônimo de prosperidade, e que a elevação da prosperidade não é a mesma coisa que crescimento econômico. O autor defende que até muito recentemente, a prosperidade não era avaliada em termos econômicos, mas como simplesmente o que se opunha à adversidade, e que este conceito de prosperidade econômica - e sua relação com o crescimento econômico - é uma construção moderna.

Segundo o autor, existem diferentes abordagens sobre a questão da prosperidade. Baseado em Sen (1984)¹⁰¹, Jackson (2009) elenca três diferentes concepções de prosperidade: prosperidade como *opulência*, como *utilidade* e como *capacidade de desenvolvimento*¹⁰².

A primeira dessas concepções - a *opulência* - está relacionada com o entendimento convencional de prosperidade como medida de satisfação material (JACKSON, 2009). Essa lógica da abundância, entretanto, possuiu limitações até mesmo dentro da teoria econômica tradicional, com a teoria da utilidade marginal decrescente, onde o fato de ter mais bens/produtos provê menos satisfação adicional (JACKSON, 2009).

A segunda caracterização da prosperidade - a *utilidade* - segundo Jackson (2009) reconhece que quantidade não é qualidade. Porém, medir a utilidade é uma tarefa complexa e difícil, visto que não é simples definir como a produção de commodities está relacionada com a satisfação (JACKSON, 2009). O autor defende que, neste sentido, o PIB não pode ser considerado um indicador de bem-estar ou utilidade.

Ainda, a terceira caracterização da prosperidade - como *capacidade de desenvolvimento* ou, nas palavras de Sen (1984), as capacidades que as pessoas têm de *florescer*¹⁰³. Sen (1984, apud JACKSON, 2009) relaciona essas capacidades a questões nutricionais, de saúde, de expectativa de vida, de participação na sociedade, todas relacionadas com as liberdades e a noção de desenvolvimento propostas por Sen (2010). Neste mesmo sentido, Thirlwall (1999), falando da questão do desenvolvimento econômico como processo que alia objetivos econômicos e sociais e, neste sentido, relacionado com o conceito de prosperidade como capacidade de desenvolvimento, afirma que é necessário distinguir e perseguir os componentes ou valores básicos e fundamentais da sustentação da vida¹⁰⁴, da autoestima¹⁰⁵ e da liberdade¹⁰⁶.

¹⁰¹ SEN, A. The Living Standard. Oxford Economic Papers, Vol. 36, 74-90. Supplement: Economic Theory and Hicksian Themes, 1984.

¹⁰² Tradução nossa. Sen (1984) e Jackson (2009) falam sobre a ideia de "*capabilities for flourishing*".

¹⁰³ "*Capabilities that people have to flourish*". Sen (1984). *Flourish*, neste sentido, pode ser entendido como desenvolver, melhorar, progredir, evoluir.

¹⁰⁴ De acordo com Thirlwall (1999), a sustentação da vida está relacionada com a provisão de necessidades

Jackson (2009) afirma que esta dimensão da prosperidade - relacionada à ampliação das capacidades, entretanto, também não pode ser ilimitada, e esta barreira está vinculada a dois fatores críticos: a finitude natural dos recursos ecológicos¹⁰⁷ e a capacidade de viver bem pensando na escala global da população. Estas questões impõem uma reflexão importante sobre a avaliação da prosperidade apenas sob o ponto de vista isolado das condições materiais. Neste sentido, o autor afirma que a prosperidade deve abarcar as dimensões intrageracional e intergeracional. Novamente, a variável tempo importa.

Dentro desta questão do enfoque intergeracional, World Bank (2005) relembra o conceito de Poupanças Genuínas¹⁰⁸. O termo, derivado dos trabalhos de Pearce e Atkinson (1993)¹⁰⁹ e Hamilton (1994)¹¹⁰, pretende ajustar a Poupança Nacional Bruta contemplando aspectos do bem-estar social e ambiental. Poupanças genuínas negativas, neste sentido, indicam que a riqueza total está declinante e o sistema socioeconômico é insustentável. Tal indicador vem sendo utilizado pelo Banco Mundial como um contraponto à avaliação do desenvolvimento tradicional pelo PIB. A principal crítica em relação à avaliação da política macroeconômica através das Poupanças Genuínas é a sua relação com a chamada sustentabilidade fraca (DIETZ; NEUMAYER, 2004), que será objeto de exame no capítulo 4.

Por fim, Jackson (2009) assevera que o crescimento econômico nem sempre pode estar atrelado ao aumento da prosperidade, e que de várias maneiras pode diminuí-la. Da mesma forma, existe uma relação não linear quanto à criação de riqueza. Reforçando a hipótese que corre transversalmente por todo o trabalho, Beinhocker (2006) afirma que a teoria evolutiva e dos sistemas complexos, neste cenário, pode fornecer uma radical nova perspectiva sobre estas questões econômicas de longo prazo.

básicas.

¹⁰⁵ Definido por Thirlwall (1999) como a percepção de respeito próprio e independência.

¹⁰⁶ Thirlwall (1999) relaciona a liberdade com os conceitos de escolha, muito próximo ao proposto por Sen (2010).

¹⁰⁷ No contexto deste trabalho, adotaremos sempre o termo *capital natural* para representar todo e qualquer bem ou ativo de origem ecossistêmica, que possui algum tipo de influência com o bem-estar. As definições, características e propriedades serão abordadas com maior detalhe no capítulo 3.

¹⁰⁸ *Genuine savings*.

¹⁰⁹ PEARCE, D. W. ATKINSON, G. Capital Theory and the Measurement of Sustainable Development: An Indicator of Weak Sustainability." *Ecological Economics* 8 (2): 103–108. 1993.

¹¹⁰ HAMILTON, K. Green Adjustments to GDP. *Resources Policy* 20 (3): 155–68. 1994

Uma das implicações mais importantes do processo de crescimento econômico, e que se opõe ao aumento da prosperidade considerada por Jackson (2009), e da riqueza no sentido definido por World Bank (2005) é a sua relação com o chamado capital natural, objeto de discussão no capítulo que segue.

O presente capítulo tem por objetivo apresentar o sistema ecológico, dentro da perspectiva da complexidade. Para tal, o capítulo é iniciado com a apresentação dos conceitos de capital natural, capital natural crítico, reforçando a questão da multidimensionalidade inerente aos mesmos. A seguir são apresentados os conceitos de estabilidade, resiliência e histerese, para, por fim, tratar dos indicadores de resiliência ecossistêmica.

Tal abordagem visa oferecer uma base para as discussões sobre a sustentabilidade que serão apresentadas no capítulo que segue.

3.1 Conceito de capital natural

O conceito de capital natural foi introduzido no contexto da discussão sobre sustentabilidade no início da década de noventa, partindo do próprio conceito de capital, este entendido como o estoque de bens que possui a propriedade de produzir outros bens e serviços no futuro (EL SERAFY, 1991; COSTANZA; DALY, 1992; DE GROOT *et al.*, 2002). A inserção do conceito teve por objetivo a incorporação da questão ambiental na análise econômica, através da consideração da variável ambiental como um elemento importante na composição da riqueza de um país ou região.

De maneira geral, o capital natural pode ser entendido como todo o estoque de bens e serviços providos pelo ambiente, que rendem fluxos de benefícios tangíveis e intangíveis (ANDRADE; ROMEIRO, 2009) e, desta forma, com alguma relevância para o bem-estar humano. Esta definição, embora direta e simples, não expressa plenamente toda a complexidade inerente ao conceito, principalmente em relação ao seu caráter dinâmico,

além de não evidenciar a superação de conotações meramente reducionistas ou utilitaristas da natureza¹¹¹.

Assim, no contexto do presente trabalho será adotado o conceito apresentado por Brand (2009), que entende capital natural como um meta-conceito¹¹² multidimensional para uma pluralidade de estoques inter-relacionados e heterogêneos que desempenham diversas funções e serviços para a sociedade (CHIESURA; DE GROOT, 2003; ARONSON *et al.*, 2006 apud BRAND, 2009).

Esse conceito evidentemente não é óbvio nem direto, e é razoável que assim o seja, pois deve abarcar toda a complexidade das relações ecossistêmicas e suas diversas dimensões de influências para o bem-estar humano. Vejamos alguns detalhes com maior cuidado.

O caráter multidimensional do conceito tem relação com a identificação e aplicabilidade em diversas escalas espaciais e temporais, tanto no nível dos ecossistemas, quanto suas influências no sistema socioeconômico e cultural, além de possibilitar a congregação de diferentes abordagens científicas e de diferentes grupos sociais em relação à valoração da natureza (BRAND, 2009).

A questão dos estoques heterogêneos em inter-relação está na base da ciência ecológica, que reconhece os diversos fluxos de energia e matéria nas mais diversas escalas do ambiente, passando pela base física inanimada até a escala dos ecossistemas, bem como suas profundas relações de interdependência (TOWNSEND; BEGON; HARPER, 2006).

¹¹¹ É importante salientar que existem muitas críticas à consideração da natureza a partir da lógica do capital, como lembram Andrade e Romeiro (2009). Rotering (2008), neste sentido, entende que o conceito de capital natural é incoerente e desnecessário, uma vez que tal visão pode viabilizar o argumento do *mainstream* econômico de que não há limitação à destruição dos atributos ambientais desde que seja garantido o proporcional incremento em outros tipos de capital. Tal discussão será aprofundada no capítulo 4. Ainda Chiesura e De Groot (2003) apresentam a preocupação sobre o conceito como ele é normalmente apresentado, que levaria ao entendimento da natureza através de um olhar essencialmente reducionista e antropocentrismo. Tais visões, entretanto, estão baseadas em uma leitura extremamente limitada do conceito de capital natural.

¹¹² De acordo com Vassão (2008), o prefixo *meta* tende a indicar o campo de conhecimento em que a abstração indica o *mais geral*, o campo mais amplo de aplicação de um conceito. Se um conceito específico encontra explicação para um caso específico, o meta-conceito seria a sua generalização, com aplicação a qualquer contexto em que aquele conceito é aplicável.

Porém, o ponto central da definição adotada por Brand (2009) é a capacidade do capital natural de desempenhar funções e serviços ecossistêmicos. É nesse ponto que o conceito apresenta sua maior inovação como mediador da relação economia-ambiente.

De Groot *et. al.* (2002) afirmam que funções ecossistêmicas podem ser conceituadas como a capacidade de componentes e processos naturais de prover bens e serviços que satisfazem necessidades humanas, direta ou indiretamente. Esse é um conceito chave, visto que evidencia a base dos tais benefícios tangíveis e intangíveis ao bem-estar humano, bem como diferencia bens (ou recursos naturais) de serviços providos pelo ambiente, associando-os a componentes e processos, respectivamente. Neste mesmo sentido, England (1998) afirma que o capital natural é composto por três componentes principais: os recursos não renováveis provenientes de ecossistemas, os recursos renováveis provenientes de ecossistemas e os serviços ecossistêmicos.

Ekins e Simon (2003), entretanto, salientam que não é possível afirmar que determinadas funções ecossistêmicas são desempenhadas por estoques particulares do capital natural. Não existem relações diretas ou lineares. Estoques particulares do capital natural podem estar envolvidos no desempenho de muitas – e talvez de tipos completamente diferentes – funções ecossistêmicas. Porém, uma função ecossistêmica pode derivar mais de processos naturais, do que de qualquer componente particular do capital natural¹¹³, e muitos componentes diferentes podem interagir nesses processos¹¹⁴ (EKINS; SIMON, 2003).

Reforçando esse conceito, Ekins e Simon (2003) afirmam que, do ponto de vista humano, o que importa de fato não é o estoque particular de capital natural por si, mas a habilidade desse estoque como um todo de desempenhar funções ecossistêmicas, já que são essas que possuem interfaces importantes com o bem-estar humano.

De Groot *et. al.* (2002) classificam as funções ecossistêmicas a partir de quatro categorias primárias: as funções de regulação¹¹⁵, as funções de habitat¹¹⁶, as funções de

¹¹³ Como o ciclo da água e do carbono, por exemplo (EKINS; SIMON, 2003).

¹¹⁴ O próprio entendimento do conceito de funções ecossistêmicas reforça a questão dos estoques heterogêneos em inter-relação.

¹¹⁵ Relacionados a processos de auto regulação e suporte da vida dentro dos ecossistemas. São exemplos funções como regulação climática, o ciclo hidrológico, a formação e ciclagem de nutrientes no solo, a

provisão¹¹⁷ e as funções de informação¹¹⁸. Dentro dessa ótica, Chiesura e De Groot (2003) apresentam um esquema que ilustra as relações entre as classes de funções ecossistêmicas do capital natural e as diversas dimensões de influência.

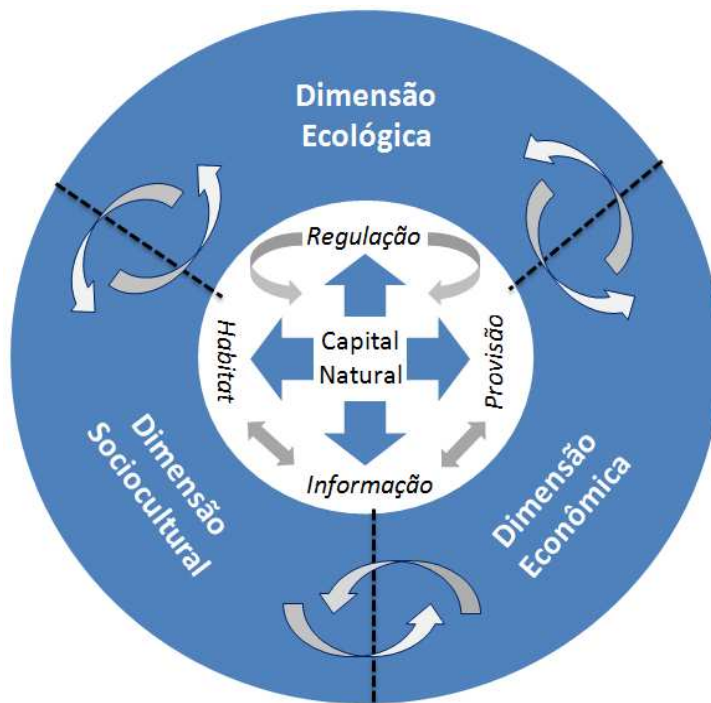


Figura 8 - Esquema com as funções do capital natural e suas relações com as dimensões de influência.
Fonte: Adaptado de Chiesura e De Groot (2003).

A leitura mais comum e tradicional da relação entre os sistemas econômico e ambiental está pautada apenas na consideração da dimensão dos recursos naturais como *inputs* de processos produtivos, ou como meras *commodities*, ou seja, dos benefícios relacionados apenas às funções de provisão, desconsiderando as influências das demais dimensões no bem-estar humano. As funções ecossistêmicas de regulação, habitat e informação – geralmente associadas aos chamados serviços ecossistêmicos, são, via de regra, omitidos ou mesmo ignorados neste debate.

polinização e a capacidade de depuração de resíduos (DE GROOT *et. al.*, 2002).

¹¹⁶ Relacionados à viabilização / manutenção de ambientes de refúgio e reprodução de espécies, com relevância para a manutenção de processos de conservação biológica, diversidade genética e evolução (DE GROOT *et. al.*, 2002).

¹¹⁷ Funções relacionadas aos chamados recursos naturais, como a provisão de alimentos, insumos materiais para processos produtivos, recursos genéticos e medicinais (fármacos, cosméticos e drogas), e recursos ornamentais (DE GROOT *et. al.*, 2002).

¹¹⁸ Associado a usos recreativos, artísticos, espirituais, cênicos, culturais, educacionais e científicos (DE GROOT *et. al.*, 2002).

Serviços ecossistêmicos podem ser entendidos como os próprios benefícios diretos e indiretos ao bem-estar humano, tangíveis e intangíveis (ANDRADE; ROMEIRO, 2009), sustentados pelas funções ecossistêmicas – e em geral, por processos ecossistêmicos.

O reconhecimento da importância da contribuição dos serviços ecossistêmicos para o bem-estar humano pode ser exemplificado através dos esforços científicos condensados na chamada Avaliação Ecossistêmica do Milênio¹¹⁹, conduzida entre 2001 e 2005, através de uma parceria entre diversas instituições internacionais e com o suporte de vários governos, que teve como objetivo a sistematização de bases científicas para a gestão sustentável dos ecossistemas, permitindo a provisão contínua dos serviços por eles gerados (ANDRADE; ROMEIRO, 2009).

A força da ampliação do entendimento do capital natural – composto por recursos naturais e serviços ecossistêmicos, reflete mesmo na tradicional e simplificada função de produção neoclássica, bem como nas análises de criação e manutenção de riqueza e prosperidade, já que a utilidade ou bem-estar humanos passam a ser associados não apenas à produção econômica, mas também diretamente relacionados à ampla gama de serviços providos única e exclusivamente pelos ecossistemas.

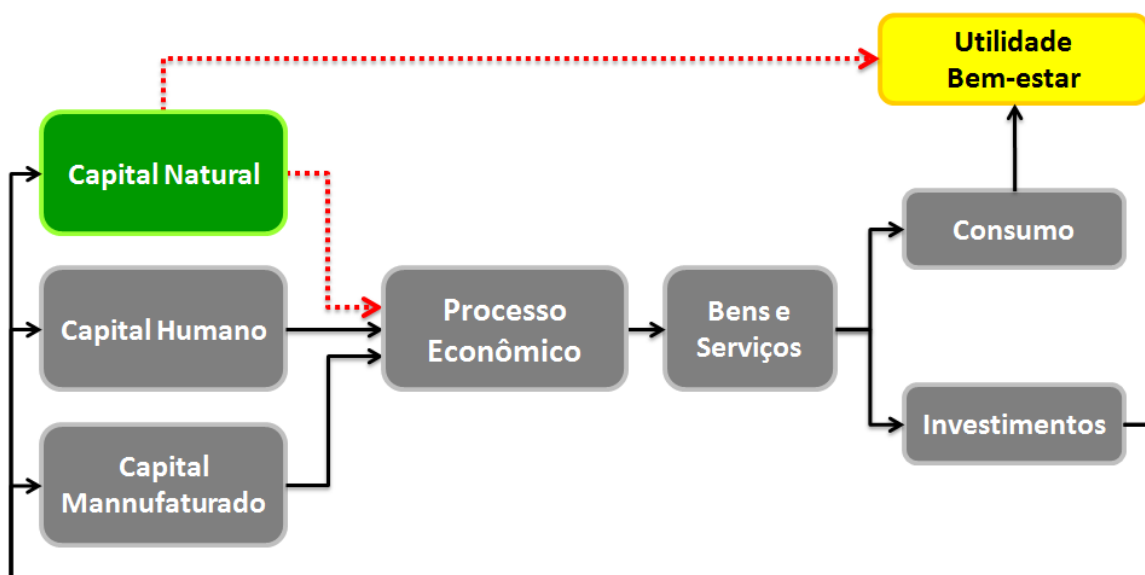


Figura 9 - Esquema geral da função de produção de três fatores adaptado, considerando o capital natural como fator de produção (*input* produtivo) e provedor direto de bem-estar humano, através dos serviços ecossistêmicos.

¹¹⁹ *Millenium Ecosystem Assessment* - programa de pesquisas sobre mudanças ambientais e suas tendências para as próximas décadas, lançado em 2001 com o apoio das Nações Unidas (MEA, 2005).

Por fim, é importante lembrar a questão da valoração monetária do capital natural, ferramenta muito utilizada como via de análise e avaliação de impactos socioeconômicos decorrentes de alterações ecossistêmicas. Mesmo sendo possível afirmar que, enquanto provedor de serviços essenciais ao bem-estar humano, o capital natural é dotado de valor econômico, os bens e serviços que compõe o capital natural, tipicamente, não possuem referência ou paralelo no mercado, em geral por sua caracterização como bens públicos (ANDRADE; ROMEIRO, 2009).

No que concerne à valoração do capital natural propriamente dita, há uma clara inconsistência metodológica, visto que as alternativas para a monetização do capital natural passam pelo conhecimento de um sistema de preços vigentes, ou seja, estimados através de mecanismos tradicionais de mercado (ROMEIRO, 2003).

Não é difícil perceber a incoerência da tentativa de atribuição de valores monetários por meio da aplicação de ferramentas adaptadas da economia neoclássica¹²⁰ e sua compatibilização com uma leitura mais ampla e dinâmica do próprio conceito de capital natural. É possível afirmar com segurança que nenhuma das ferramentas de valoração monetária existentes, e amplamente utilizadas, possui condições de captar e expressar toda a complexidade inerente ao conceito de capital natural. A simplificação e redução do capital natural baseado na atribuição de um valor monetário obviamente parcial, visando encontrar uma linguagem comum para a realização de análises comparativas entre os sistemas ambiental e econômico, implicam em uma distorção do conceito, além de possibilitar interpretações equivocadas no sentido de reforçar a lógica neoclássica utilitarista.

¹²⁰ Para mais detalhes sobre as metodologias de valoração ambiental, ver Serôa da Motta (1998) e TEEB (2010).

3.2 Criticidade do capital natural

Uma derivação do conceito de capital natural é o conceito de capital natural crítico, desenvolvido inicialmente por Turner (1993)¹²¹. O'Connor (1999) define capital natural crítico como o conjunto de recursos ambientais que, em determinada escala geográfica, executam importantes funções ambientais e para as quais não existem substitutos em termos dos diferentes capitais. English Nature (1996) amplia o conceito, afirmando que capital natural crítico são os recursos, níveis de estoque ou de qualidade que são altamente valorados e essenciais para a saúde humana e para o funcionamento dos sistemas de suporte à vida, ou insubstituíveis¹²² para todo o objetivo real.

Por ser um conceito derivado do já complexo conceito de capital natural, a identificação de sua criticidade deve ser avaliada segundo os diferentes domínios de influência do conceito principal, ou seja, o próprio conceito de capital natural crítico está associado a dimensões específicas de criticidade (BRAND, 2009).

De acordo com o autor, existem seis dimensões que devem ser consideradas, conforme segue: a) dimensão sociocultural; b) dimensão ecológica; c) dimensão da sustentabilidade; d) dimensão ética; e) dimensão econômica¹²³ e, f) dimensão da sobrevivência humana¹²⁴ (BRAND, 2009), todas relevantes do ponto de vista da sustentabilidade.

Desta forma, diferentes componentes e processos do capital natural podem ter vários graus de criticidade, e são relacionados – em grande parte – a valores e padrões de vida específicos, que podem mudar ao longo do tempo (BRAND, 2009).

Porém, o centro rígido que embasa o conceito de criticidade do capital natural é a afirmação de que não existem substitutos para funções ecossistêmicas perdidas ou

¹²¹ O termo aparece também em Pearce e Atkinson (1993), porém ainda não examinado em maiores detalhes.

¹²² A questão da substitutibilidade entre capitais será objeto de avaliação no capítulo 4.

¹²³ Associado aos custos econômicos – ou externalidades – da redução ou perda de determinadas funções ecossistêmicas (BRAND, 2009).

¹²⁴ Criticidade associada à inviabilização de funções de regulação mais básicas (BRAND, 2009).

inviabilizadas¹²⁵ (EKINS *et. al.*, 2003). Ekins e Simon (2003) afirmam que o argumento da não substitutibilidade do capital natural e de suas funções ecossistêmicas está baseado em cinco suposições: a) caráter multifuncional do capital natural, uma vez que um atributo pode cumprir uma série de funções, as quais não são possíveis haver substituto completo pelo capital produzido; b) diferenças intrínsecas e fundamentais no funcionamento do capital natural e produzido, uma vez que há dependência apenas do produzido pelo natural, enquanto o natural possui uma dinâmica própria e independente; c) a questão das incertezas associadas à complexidade dos processos ecossistêmicos e suas relações com a esfera socioeconômica; d) a questão da irreversibilidade dos processos de degradação e/ou exploração dos elementos do capital natural e; e) atribuição de valor intrínseco e aversão às perdas, de um modo geral¹²⁶.

Ainda, Ekins *et. al.* (2003) afirmam que capital natural crítico representa a parte do ambiente que deve ser mantida sob todas as circunstâncias, em favor da manutenção de importantes recursos e serviços ecossistêmicos, que não possuem substitutos, para as gerações presentes e futuras.

Neste sentido, é na vulnerabilidade das funções ecossistêmicas que reside o foco do conceito. E considerando a complexidade e interdependência dos estoques e fluxos de matéria e energia, dos componentes e dos processos ecossistêmicos, e de seus reflexos diretos e indiretos no bem-estar humano, é fundamental abordar conceitos complementares e imprescindíveis para respaldar a questão da vulnerabilidade do capital natural, como estabilidade, resiliência e histerese, que são apresentados a seguir.

¹²⁵ Questão essa que está no cerne do conceito de sustentabilidade forte, detalhado no tópico 4.3 deste trabalho.

¹²⁶ Tal questão será retomada no capítulo 4.

3.3 Estabilidade, resiliência e histerese

Considerando o até aqui exposto, é possível afirmar com segurança que a relação entre os componentes do estoque de capital natural, sua capacidade de desempenhar funções ecossistêmicas e, conseqüentemente, seus reflexos nas dimensões sociais e econômicas, podem ser consideradas como complexas, dinâmicas e não lineares (EKINS; SIMON, 2003; BRAND 2009). Neste sentido, conceitos consolidados como resiliência e histerese são essenciais dentro do contexto da sustentabilidade (BRAND, 2009), e sua relevância está associada à viabilidade e à vulnerabilidade da manutenção das funções ecossistêmicas.

O conceito de resiliência emergiu da teoria ecológica na década de 1960 e, desde então, foi adotado por diversas disciplinas científicas e atualmente é tratado como um conceito estratégico e inovador, com a capacidade de realizar leituras conjuntas de sistemas socioeconômicos e ecológicos (WALKER *et. al.*, 2006 apud BRAND, 2009). Gunderson e Allen (2009) lembram a base etimológica da palavra, quem vem do latim *resilire*, que significa retorno¹²⁷.

De uma forma mais ampla, resiliência pode ser definida como a magnitude do distúrbio que um sistema pode absorver sem mudar para um estado de estabilidade alternativo (SCHEFFER, 2009). Há, portanto, uma relação direta entre os conceitos de resiliência e estabilidade.

Holling (2009), ampliando a aplicação dos conceitos de resiliência e estabilidade, parte dos mesmos para propor a caracterização dos comportamentos de sistemas ecológicos. Resiliência, segundo o autor, é uma propriedade do sistema e a persistência, o resultado dessa propriedade, visto que a resiliência determina a persistência das relações internas de um sistema e é uma medida da habilidade desses sistemas de absorver mudanças de variáveis e parâmetros e ainda sim persistir.

¹²⁷ Gunderson e Allen (2009) traduzem *resilire* como *leap back*.

Estabilidade, ainda segundo Holling (2009), é a habilidade de um sistema retornar a um estado de equilíbrio depois de um distúrbio temporário. Quanto mais rápido for o retorno às condições iniciais, mais estável o sistema pode ser considerado. Assim, a estabilidade é uma propriedade do sistema e os níveis de flutuação em torno de um estado específico é o resultado da propriedade.

Quadro 4 - Propriedades que regem comportamentos de sistemas ecológicos.

Propriedade	Definição	Resultado
Resiliência	Habilidade ou capacidade de um sistema de absorver mudanças e resistir	Graus de persistência
Estabilidade	Habilidade ou capacidade de um sistema retornar ao estado de equilíbrio original depois de pequenas alterações nas condições externas	Níveis de flutuação - o quanto o sistema pode variar / flutuar em torno de um estado de equilíbrio

Fonte: Adaptado de Holling (2009)

A análise do sistema ecológico a partir dessas propriedades permite entender as diversas possibilidades de comportamento, como cenários onde um sistema pode ser muito resiliente e ainda sim com grandes flutuações, ou pouca estabilidade (HOLLING, 2009), ou o contrário, quando o sistema é pouco resiliente, mas com grande estabilidade, como no caso de sistemas com componentes muito homogêneos.

No mesmo sentido, Brand (2009), a partir do conceito geral de resiliência, define resiliência ecológica como a capacidade de um ecossistema resistir a perturbações e ainda se manter em um estado específico de equilíbrio.

Para explicar a lógica por trás das propriedades de resiliência e da estabilidade, Scheffer *et al.* (2001) utilizam a representação do que eles chamam de paisagem de estabilidade¹²⁸ para ilustrar a teoria dos atratores alternativos que, segundo os autores, permite entender como as condições externas podem afetar a resiliência de um sistema, evidenciando a existência de estados alternativos de equilíbrio. Dentro desta analogia das paisagens de estabilidade, é possível perceber as regiões onde o sistema - representado pela esfera (figura 9) - está em equilíbrio estável, ou seja, dentro das chamadas bacias de atração.

¹²⁸ *Stability landscapes.*

Scheffer *et al.* (2001) afirmam que o tamanho destas bacias de atração está relacionado com a resiliência do sistema, já que alterações das condições externas influenciam o tamanho da bacia e a resiliência sem, entretanto, afetar significativamente o equilíbrio do sistema, significando que mesmo que o sistema apresente um comportamento estável, ou inalterado, pequenas alterações adicionais nas condições externas podem levá-lo a outro estado de equilíbrio.

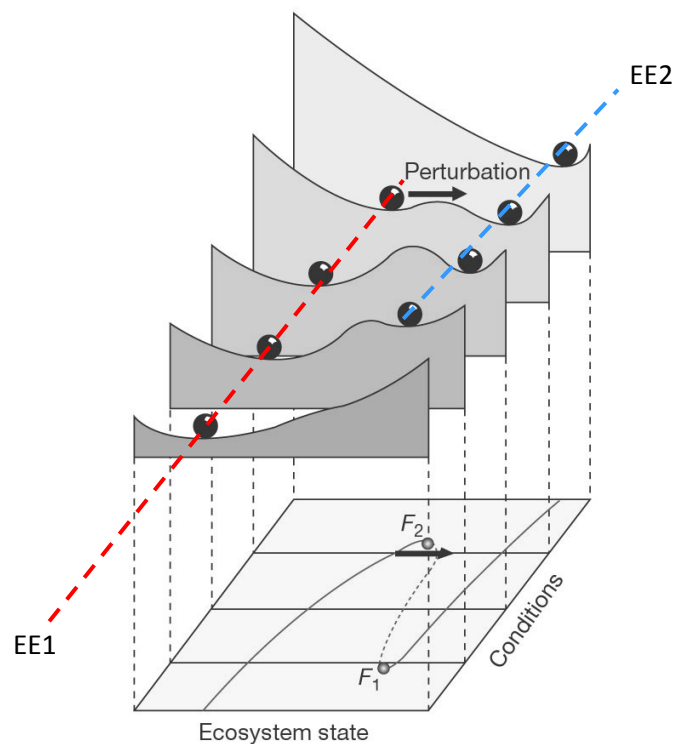


Figura 10 - Paisagens de equilíbrio e mudança de estado de equilíbrio
 EE1 - Estado de equilíbrio original do sistema. EE2 - Estado de equilíbrio alternativo.
 Fonte: Adaptado de Scheffer *et al.* (2001).

Scheffer e Carpenter (2003), visando evitar confusões com flutuações naturais e dinâmicas internas próprias de ecossistemas, propõe a adoção de termos como *mudança de regimes* ou *atratores*, em vez de *estados estáveis* ou *equilíbrio*, visando descrever mais apropriadamente mudanças repentinas em ecossistemas.

De uma forma geral, a teoria dos atratores alternativos descreve o comportamento de um sistema submetido a variações nas condições externas, logicamente nos casos onde há a influência de mais de um atrator. Nesses casos, é plausível afirmar que o sistema pode

ter mais de um estado de equilíbrio para um mesmo valor das condições externas, conforme apresentado na figura 9 (SCHEFFER; CARPENTER, 2003).

A importância da consideração dos conceitos de resiliência e estabilidade, no contexto do presente trabalho, está centrada no fato de que uma eventual mudança no estado de equilíbrio – ou a perda da resiliência - pode ser entendida como uma ruptura na capacidade de regeneração das funções ecossistêmicas, com perdas praticamente irreversíveis e custos de recuperação altíssimos.

O grande motivo por trás da preocupação com a perda da resiliência reside especialmente neste quesito. Numa situação mais extrema, mas concreta para uma parcela significativa do capital natural¹²⁹, tem-se o cenário de irreversibilidade. Um cenário menos radical ocorre quando existe a possibilidade de retorno ao regime original de equilíbrio com esforços de recuperação desproporcionais, configurando um fenômeno típico de sistemas complexos quando existe a dominância de mais de um estado de equilíbrio - ou atrator, denominado histerese¹³⁰.

Histerese pode ser conceituado como um fenômeno no qual as mudanças nos estados seguem diferentes vias em sua trajetória normal e na direção reversa ou contrária (IBELINGS *et al.*, 2007).

Vários são os mecanismos que suportam tal comportamento. Como os processos ecossistêmicos podem ser considerados como sistemas com comportamentos não lineares, compostos por agentes e processos heterogêneos fortemente conectados e em interação dinâmica, com inúmeras relações de *feedback* positivos e negativos, os caminhos de ida e volta (degradação e recuperação) não são, ou podem não ser necessariamente os mesmos.

¹²⁹ Principalmente os relacionados à biodiversidade.

¹³⁰ Folke *et al.* (2002) e Scheffer (2009) elencam uma série de sistemas ambientais onde tal comportamento ocorre.

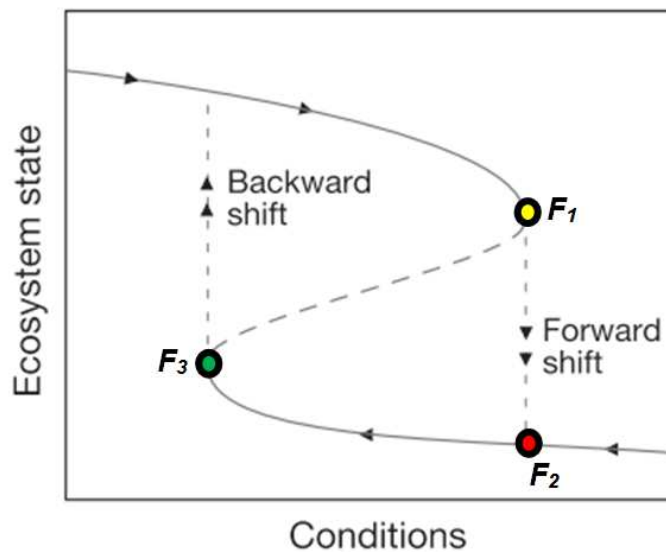


Figura 11 - Esquema com os diferentes caminhos ou comportamentos que um ecossistema pode apresentar com a variação de determinadas condições.
Fonte: Adaptado de Scheffer *et. al.* (2001)

A figura 10 ilustra o fenômeno da histerese de maneira estilizada. Submetido à alteração das condições, o ecossistema passa por um período inicial de gradativa pressão até atingir o ponto de perda da resiliência (F_1). A partir deste ponto ocorre uma transição crítica de fase, onde adquire relativa estabilidade (F_2). O retorno à condição inicial depende de esforços muito mais intensos em relação às condições externas, já que o caminho de volta (de F_2 à F_3) implica na redução dos parâmetros da condição muito além daqueles ultrapassados no momento da ruptura em F_1 (SCHEFFER, 2009). Transições críticas ocorrem se um sistema muda sua influência de um atrator para outro (SCHEFFER, 2009).

Este processo – transições críticas não sobrepostas, denominado histerese - é esperado em diversas situações de ecossistemas submetidos a algum nível de distúrbio, como ecossistemas lacustres e costeiros, vegetação em ambientes secos, extinções de espécies em paisagens fragmentadas, mudanças climáticas, entre outras (FOLKE *et. al.*, 2002; SCHEFFER, 2009). Em qualquer que seja o caso, transição crítica de fase em ecossistemas implica na interrupção da viabilidade de suas funções ecossistêmicas.

Porém, o caminho da histerese é apenas uma das possibilidades de comportamento de um sistema complexo submetido à variação das condições externas. Três possibilidades de caminhos ou comportamentos podem ocorrer, tipicamente: o comportamento linear, o

comportamento de ruptura - que pode ser suave ou brusca, e o comportamento de transição crítica e histerese. A figura 11 apresenta estes comportamentos de modo estilizado.

Nos gráficos (a) e (b), há apenas um estado de equilíbrio para cada condição. Observe que, caso a ruptura em (b) fosse mais brusca, poderia haver dois estados de equilíbrio sobrepostos exatamente no ponto de ruptura. Já no gráfico (c), é possível identificar três estados de equilíbrio para cada valor das condições externas. As setas indicam a direção preferencial do sistema quando o sistema não está em equilíbrio. As curvas representam os estados de equilíbrio estáveis e o trecho tracejado representa estados de equilíbrio instáveis¹³¹.

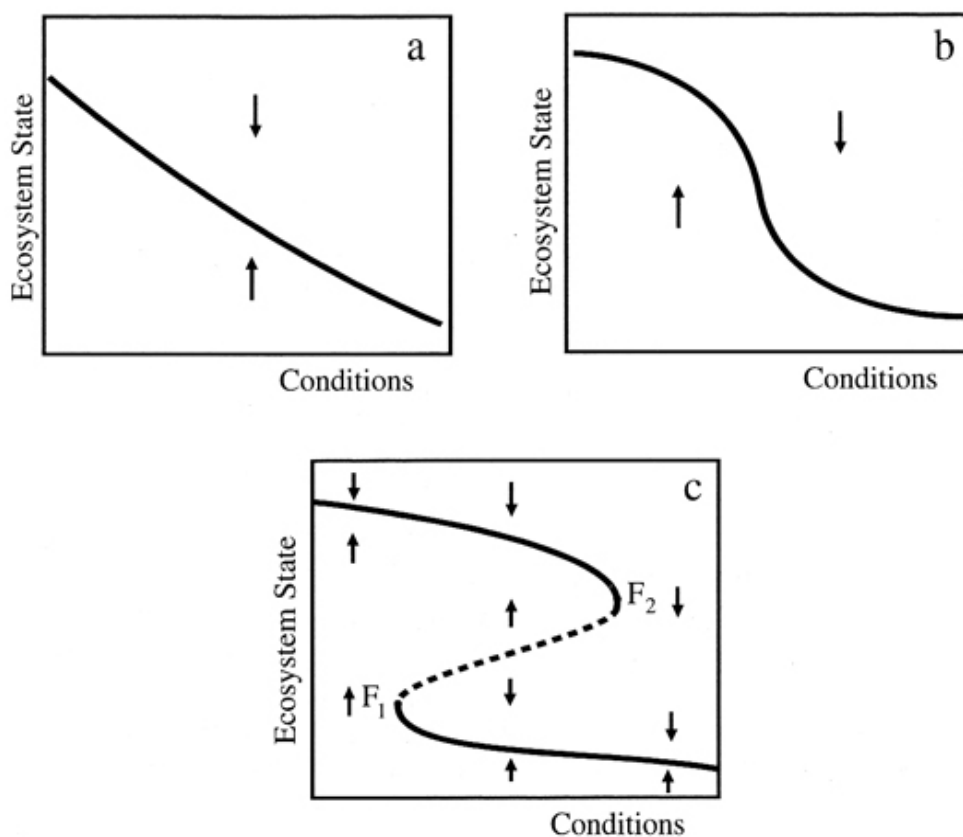


Figura 12 - Representação esquemática dos possíveis caminhos de mudanças nos estados de equilíbrio de um sistema.

Fonte: Scheffer (2009)

¹³¹ Retornando à ideia de paisagens de estabilidade, estes pontos de equilíbrio instáveis podem ser representados como os cumes, ou pontos mais altos da paisagem, onde qualquer alteração mínima nas condições externas deslocará o equilíbrio para outra bacia de atração.

Dentro do contexto da sustentabilidade, o entendimento de tais comportamentos é fundamental, visto que, mesmo que a perturbação de uma determinada função ecossistêmica não seja irreversível, os investimentos na recuperação do capital natural perdido certamente demandarão custos elevadíssimos, muito acima dos necessários na fase pré-transição crítica. Essa é uma das justificativas mais fortes no sentido da necessidade de investimentos no capital natural, além de garantir a viabilidade de diversas funções ecossistêmicas.

Neste ponto é possível inserir a lógica que permeia o aclamado princípio da precaução, já consagrado no direito ambiental internacional (SIRVINSKAS, 2008). Como o ponto de transição crítica varia de ecossistema para ecossistema e, portanto, é de difícil predição, o princípio da precaução apresenta-se como uma medida de prudência real, mesmo do ponto de vista econômico.

3.4 Indicadores de resiliência ecossistêmica

Uma questão que emerge após a consideração do capital natural a partir das características e propriedades apresentadas até aqui é como avaliar adequadamente as alterações de maneira a captar toda a complexidade inerente ao conceito.

Existem muitas metodologias para mensurar o capital natural existente e suas alterações, que oscilam do tratamento econômico neoclássico da valoração da somatória de alguns componentes, ao uso de indicadores de saúde e integridade ecossistêmica.

Como será apresentado no capítulo 4, há uma relação direta entre as condições do capital natural e os conceitos de sustentabilidade. É importante, neste sentido, entender quais são as principais metodologias para avaliação dessa relação. Gasparatos e Scolobig (2012) apresentam um esquema síntese das principais ferramentas para a realização deste tipo de análise, divididas em três classes: a) as ferramentas monetárias de valoração

neoclássica¹³² e deliberativa¹³³, que incluem as ferramentas de análises agregadas, como a análise custo benefício, a contabilidade total de custos e modelagem¹³⁴; b) as ferramentas biofísicas, que incluem a pegada ecológica e as análises termodinâmicas e, c) as ferramentas baseadas em indicadores agregados, como os indicadores compostos e as análises multi-critério¹³⁵.

Interessa, neste momento, identificar instrumentos e ferramentas com a capacidade de expressar as variações do capital natural, considerando suas propriedades e dinâmicas, para posteriormente cruzá-la com dados sobre o sistema econômico. Assim, das ferramentas propostas por Gasparatos e Scolobig (2012), o foco principal será orientado para as ferramentas biofísicas.

É importante, porém, abrir um parêntese para tratar de algumas ferramentas e indicadores baseados na valoração monetária, em razão da relevância para o debate das relações entre os sistemas econômico e ecológico, mesmo que as mesmas não possuam condições de captar todas as dimensões do conceito de capital natural¹³⁶.

Um trabalho emblemático relacionado às ferramentas de valoração monetária foi o levantamento de Costanza *et al.* (1997), que estimaram os fluxos anuais de serviços ecossistêmicos de uma parcela significativa do estoque global de capital natural, principalmente baseado no método de disponibilidade a pagar, ou valoração contingente. England (1998), avaliando o esforço de Costanza *et al.* (1997), lembram que, em razão da imperfeição ou ausência de mecanismos de mercado para serviços ecossistêmicos, houve dificuldades em estimar o valor para cada tipo de serviço ecossistêmico. Mesmo assim, o trabalho chegou ao número de U\$ 33 trilhões anuais. Tal esforço, embora frágil do ponto de vista metodológico, representa uma legítima tentativa de inserir dimensões do capital natural no cenário macroeconômico.

¹³² Dentro das ferramentas de valoração monetária neoclássica, Gasparatos e Scolobig (2012) incluem os métodos de preços de mercado, de benefícios transferíveis, preços hedônicos, custos de viagem e avaliação contingente, todos baseados nas metodologias previstas por TEEB (2010).

¹³³ A partir de Zografos e Howarth (2010).

¹³⁴ Baseado na proposta de Bebbington *et al.* (2007).

¹³⁵ Baseados em Nardo *et al.* (2008).

¹³⁶ As ferramentas e métodos de valoração monetária não são objeto de estudo do presente trabalho em razão da sua total incompatibilidade com a amplitude do conceito de capital natural adotado.

Ainda neste sentido, Azqueta e Sotelsek (2007) relembra outros esforços no sentido de inserir o capital natural dentro dos sistemas de contas nacionais, ainda através da valoração monetária, com destaque para as Poupanças Genuínas propostas pelo Banco Mundial (WORLD BANK, 1997, 2005), e o Sistema Integrado de Contas Econômicas e Ambientais¹³⁷ das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2003). Ambas, porém, são objeto de severas críticas em razão da sua associação com o conceito de sustentabilidade fraca¹³⁸ (PILLARISSETTI, 2005; DIETZ; NEUMAYER, 2004, 2007), além de trabalhar apenas como estoques, assumindo implicitamente que o comportamento de depleção obedece à uma lógica linear, sem entrar em detalhes sobre níveis de resiliência, estabilidade ou capacidade de suporte.

Fechando o parêntese e retornando à esfera das ferramentas biofísicas, uma iniciativa importante são as chamadas Contas Nacionais de Pegada Ecológica¹³⁹, cujo principal enfoque está no levantamento da biocapacidade de um país e no cruzamento com as informações sobre a utilização e exploração do capital natural. Segundo o Global Footprint Network (2012), o termo biocapacidade ou capacidade biológica¹⁴⁰ se refere à capacidade dos ecossistemas de prover recursos biológicos úteis¹⁴¹ e absorver resíduos gerados por atividades humanas. A biocapacidade de uma região é calculada multiplicando a área física atual por um fator de produção e pelo fator de equivalência, sendo o primeiro fator relacionado à contabilidade das diferenças entre os países na produtividade de um determinado tipo de terra, ou de tipo de uso do solo¹⁴², e o segundo fator relacionado à conversão do tipo de uso do solo em produtividade (GLOBAL FOOTPRINT NETWORK, 2012).

O cruzamento das curvas de biocapacidade com as de pegada ecológica nacional evidencia os diversos cenários na escala global. Abaixo são apresentados alguns exemplos de curvas de biocapacidade e de pegada ecológica para o Brasil, China, Estados Unidos e Reino Unido, evidenciando a (in)sustentabilidade da relação entre os sistemas ambiental e socioeconômico.

¹³⁷ SEEA - System of integrated Environmental and Economic Accounting

¹³⁸ Ver Capítulo 4.

¹³⁹ NFA - National Footprint Accounts

¹⁴⁰ Termo análogo à capacidade de suporte.

¹⁴¹ Recursos biológicos úteis são definidos por Global Footprint Network (2012) como aqueles demandados pela economia. O termo útil deve ser entendido como dinâmico, uma vez que pode variar de ano a ano.

¹⁴² Referem-se à áreas de lavouras, pastagens, floresta, solo, áreas edificadas e ambientes aquáticos.

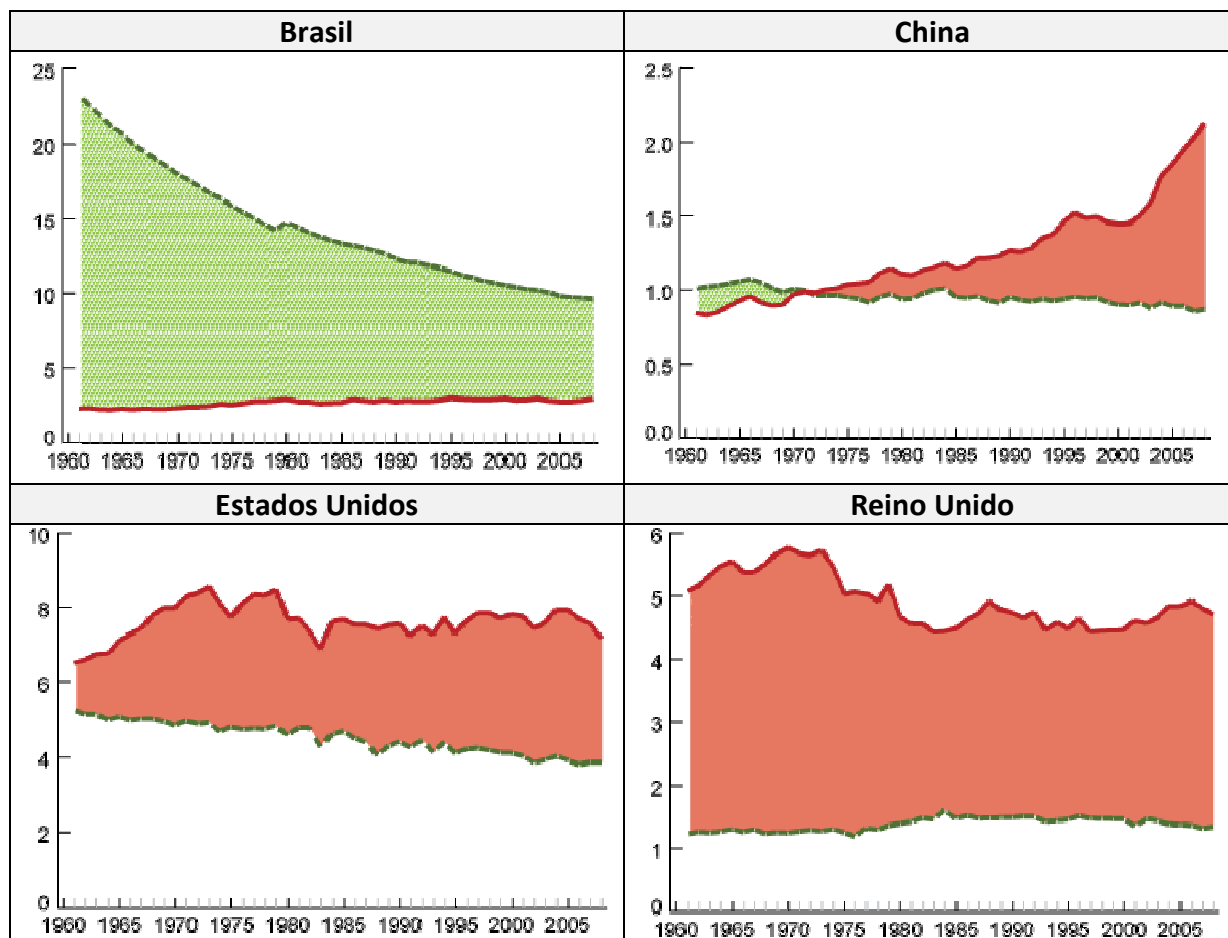


Figura 13 - Contas Nacionais de Pegada Ecológica.

No eixo das ordenadas, são apresentadas as unidades de Hectares Globais per capita, conceito que se refere à área ponderada pela produtividade dividida pela população. As linhas vermelhas são as curvas de pegada ecológica propriamente dita e as linhas verdes são as curvas da biocapacidade, ano a ano. Fonte: Global Footprint Network (2012)

A maior virtude da metodologia é a utilização do conceito de biocapacidade que, embora parta de uma avaliação simples baseada em fatores de conversão e equivalência, muito em razão da opção da escala de análise, traz uma relação com o conceito de resiliência.

Mantendo o suporte nos conceitos de resiliência, e das ferramentas biofísicas apontadas por Gasparatos e Scolobig (2012), é importante inserir instrumentos análogos, como os indicadores de integridade ecossistêmica (KAY; SCHEIDER, 1992) e os indicadores de saúde ecossistêmica (JORGENSEN, *et al.*, 2010). Costanza *et al.* (1992 apud JORGENSEN, *et al.*, 2010) afirmam que o conceito de saúde ecossistêmica deve abarcar simultaneamente os

conceitos de homeostase¹⁴³, ausência de problemas ou doenças, diversidade e complexidade, estabilidade e resiliência, vigor e oportunidades para o crescimento, e o balanço entre os componentes do sistema.

Jorgensen *et al.* (2010) afirmam que, dada a complexidade do objeto de análise, são muitos os tipos de indicadores de saúde ecossistêmica, com aplicações várias, em diferentes escalas de observação e análise. Assim, os autores optam por apresentá-los a partir de uma classificação por níveis, associados principalmente à escala de análise.

No nível 1, estão elencados os indicadores baseados no nível das espécies, que analisam e caracterizam as condições ambientais a partir do levantamento da dominância ou ausência de espécies indicadoras. No nível 2 estão os indicadores que utilizam razões entre classes de organismos. Indicadores do nível 3 são baseados em concentrações de compostos químicos, como o caso da concentração de fósforo total como indicador de eutrofização. No nível 4, os indicadores são construídos a partir de concentrações de níveis tróficos inteiros¹⁴⁴. No nível 5 utiliza taxas de processos como indicadores, como a produtividade primária. Os indicadores do nível 6 são relacionados à atributos definidos por Odum¹⁴⁵ para a identificação do estágio de desenvolvimento de ecossistemas (JORGENSEN, *et al.*, 2010).

Por fim, o nível 7 engloba indicadores holísticos como resistência, resiliência, capacidade de amortecimento¹⁴⁶, biodiversidade, tamanho e conexão de redes ecossistêmicas, taxa de sequestro de carbono e nitrogênio. No nível 8 estão representados os indicadores termodinâmicos, ou super holísticos (JORGENSEN, 2010), como exergia, emergia, produção entrópica, entre outros (JORGENSEN, *et al.*, 2010).

No contexto do presente trabalho, cujo foco está nas influências e relações entre os sistemas econômico e ambiental como um todo, bem como a amplitude do conceito de

¹⁴³ Estado de equilíbrio dinâmico interno a um determinado sistema conferido por um conjunto de elementos auto reguladores que sustentam restabelecimento regular de sua estrutura e composição em relação aos fluxos de matéria e energia (FIERZ, 2008; FAVERO, 2007).

¹⁴⁴ Como o caso da concentração de fitoplâncton como indicador de eutrofização em ecossistemas aquáticos (JORGENSEN *et al.*, 2010).

¹⁴⁵ ODUM, E. P. The strategy of ecosystem development. Science 164:262–70, 1969. ODUM, E. P. Fundamentals of ecology. Philadelphia: W. B. Saunders Co, 1971.

¹⁴⁶ *Buffer capacity* - conceito muito próximo à estabilidade, aplicada numa escala multidimensional para ecossistemas (JORGENSEN, *et al.*, 2010).

capital natural aqui adotado, o uso de indicadores holísticos e baseados na abordagem termodinâmica apresentam-se claramente como mais adequados. Embora o uso desses indicadores não permita a identificação clara dos componentes do capital natural sob maior vulnerabilidade, sua utilização admite realizar uma leitura mais ampla a respeito do comportamento geral do sistema quando submetido a alterações em determinadas condições, principalmente sob a ótica das funções ecossistêmicas. Ainda, indicadores termodinâmicos permitem mensurar variações nas condições ecossistêmicas totais, por considerar que a energia disponível em um ecossistema é o produto das condições gerais, das características estruturais e funcionais, e da complexidade do sistema como um todo (JORGENSEN, 2010).

O chamado índice de eco-exergia pode ser considerado um indicador importante e útil neste contexto. De uma maneira geral, a eco-exergia indica a quantidade de energia que um sistema possui, e que pode ser extraída com a capacidade de realizar trabalho¹⁴⁷ (KABERGER; MANSSON, 2001). Como toda e qualquer atividade necessita de energia para trabalho, o indicador pode ser considerado como uma expressão da sustentabilidade do sistema (CHEN; CHEN, 2007, JORGENSEN, 2010). Ainda, baixos níveis de eco-exergia em um ecossistema podem indicar maior vulnerabilidade e menos resistência ou estabilidade (JORGENSEN, 2010). Porto e Martinez-Alier (2007) afirmam que a exergia¹⁴⁸ pode ser considerada como "parâmetro para avaliar a degradação ou perdas de energia de um sistema, e do ponto de vista econômico e ecológico sua análise funciona como um indicador da interação do sistema com o ambiente e seus impactos".

Complementarmente, a eco-exergia específica pode ser obtida pela razão da eco-exergia pela biomassa total de um determinado sistema (JORGENSEN, 2010). Costanza (1992) e Jorgensen (2010) elencam atributos que caracterizam o índice de eco-exergia e de eco-exergia específica como indicadores de saúde ecossistêmica, principalmente nas suas relações com conceitos como homeostase, diversidade, estabilidade, resiliência e vigor. Os

¹⁴⁷ Trabalho pode ser conceituado, do ponto de vista da física, como a "maneira de transferir energia em uma ação coerente" (SCHNEIDER; SAGAN, 2006 apud CECHIN, 2008).

¹⁴⁸ Kaberger e Mansson (2001) lembram a origem etimológica do termo exergia é combinação de sílabas gregas que significam "*fora de*" e "*trabalho*", termo sugerido por RANT, Z. Exergie: ein neues wort für technische arbeitsfähigkeit. Forschung Gebiet Ingenieurwesens 22, 36–37, 1956.

autores afirmam que existe uma relação diretamente proporcional entre todos estes conceitos, ou seja, é possível concluir que os indicadores de eco-exergia e eco-exergia específica podem ser considerados como indicadores muito informativos da saúde e sustentabilidade dos ecossistemas já que, se um ecossistema mantém altos níveis de eco-exergia, por longos períodos de tempo, os conceitos acima apresentados estão ocorrendo em níveis saudáveis e sustentáveis (JORGENSEN, 2010). Ainda, é possível realizar um paralelo entre os níveis de exergia de um ecossistema e a viabilidade das funções ecossistêmicas.

De fato, o índice de eco-exergia e a biocapacidade podem ser consideradas como ferramentas importantes e singulares para a análise dinâmica do comportamento do capital natural de maneira integral, quando submetido a variações decorrentes de perturbações externas. Um desafio, porém, é compatibilizar os diferentes caminhos e comportamentos possíveis, principalmente quando o sistema é submetido a mudanças nos regimes de equilíbrio, com a ruptura dos limiares de resiliência. O capítulo 5 apresentará um exercício de modelagem que pretende simular estas condições de maneira estilizada, para posteriormente realizar algumas reflexões sobre as consequências e influências nos conceitos de riqueza, prosperidade e crescimento econômico.

Após as discussões realizadas nos dois capítulos anteriores, sobre os sistemas econômico e ambiental, o presente capítulo tem por objetivo sintetizar as discussões sobre o tema da sustentabilidade, como um conceito balizador entre os referidos sistemas.

Antes, porém, são apresentadas as discussões sobre os processos produtivos e os limites impostos pela segunda lei da termodinâmica, a questão do progresso tecnológico, tema tão central nas modernas discussões sobre o crescimento econômico. Por fim, são discutidos os conceitos de sustentabilidade, principalmente nas suas vertentes fraca e forte, e sua avaliação sob o ponto de vista da complexidade.

4.1 Processos produtivos e entropia

Conforme discutido no capítulo 1, a mudança de paradigma da "*Velha Economia*" para a "*Nova Economia*", prevista por Arthur (WALDROP, 1992), ou na chamada "*Economia da Complexidade*" (BEINHOCKER, 2006), implicaria no abandono das analogias mecânicas que balizaram a ciência econômica desde a revolução marginalista. A incorporação de conceitos originários da teoria da evolução e da termodinâmica estaria na base dessa nova corrente de pensamento econômico (BEINHOCKER, 2006). Estas questões, embora ainda distantes do núcleo do *mainstream* econômico, deram suporte a linhas de pensamento alternativas, dentre elas a chamada Economia Ecológica.

A termodinâmica, de fato, ocupa um lugar central no desenvolvimento do pensamento ecológico econômico. Cechin (2008) recorda que as contribuições de Kenneth Boulding, Georgescu-Roegen, Herman Daly e Robert Ayres & Aleen Kneese, na década de 1960, em relação à termodinâmica, foram fundamentais na consolidação do que hoje é

chamada de Economia Ecológica. Amazonas (2009) afirma que há uma opinião corrente que, em última instância, é a incorporação das leis da termodinâmica que dá unidade à Economia Ecológica.

Neste sentido, Cechin (2008) afirma que as contribuições de Georgescu-Roegen têm inspirado e influenciado programas de pesquisa em economia ecológica e na economia da complexidade, ambas na fronteira do conhecimento, tanto pela sua visão biofísica do processo produtivo, quanto por ter chamado a atenção para as implicações epistemológicas mais gerais da lei da entropia.

Georgescu-Roegen, em sua obra mais importante, *The Entropy Law and the Economic Process*, de 1971, discute quase que exclusivamente a diferença irreduzível entre a mecânica e a segunda lei da termodinâmica, considerando esta última como uma lei evolucionária (CECHIN, 2008). Ainda, Georgescu-Roegen defende que, do ponto de vista físico, a produção econômica é uma transformação entrópica (CECHIN, 2008), e que a entropia é a mais econômica das leis físicas (BAUMGÄRTNER, 2003).

Entropia, termo inicialmente cunhado por Celsius em alusão à versão em grego para a palavra transformação¹⁴⁹, é comumente descrita como uma medida de desordem (KABERGER; MANSSON, 2001; ATKINS; JONES, 2006; BEINHOCKER, 2006). De acordo com a segunda lei da termodinâmica, a entropia de um sistema isolado aumenta em qualquer processo espontâneo. A entropia é uma função de estado (ATKINS; JONES, 2006). Ainda, Cechin (2008) afirma que a entropia está relacionada às mudanças que ocorrem inerentemente à conservação de energia de um dado sistema. Num sistema isolado, a degradação da energia tende a um máximo e nunca decresce, e tal processo é irreversível (CECHIN, 2008).

De uma maneira geral, a entropia pode ser entendida como uma medida de capacidade de um sistema de realizar trabalho, e o equilíbrio termodinâmico é atingido quando a entropia total do sistema atinge seu valor máximo e a capacidade de realizar trabalho é igual a zero (BAUMGÄRTNER, 2003).

¹⁴⁹ Embora cunhado por Celsius, foi Carnot (1796-1832) que, através de seus estudos sobre a máquina a vapor, possibilitou a formulação da lei da entropia (SINISGALLI, 2005).

A segunda lei da termodinâmica prevê que “nenhum processo onde haja transformação de energia ocorrerá espontaneamente, a menos que haja uma degradação de energia de uma forma concentrada em uma forma dispersa” (SINISGALLI, 2005). Ainda, essa degradação quantitativa da energia é irreversível e passível de medição, e sua reutilização para o trabalho mecânico torna-se impossível (BRANCO, 1989; SINISGALLI, 2005). Ou seja, toda experiência que envolva transformação de energia ou material é unidirecional (BAUMGÄRTNER, 2003).

Porém, fora do mundo dos sistemas isolados, é possível notar padrões de organização que contradizem, ao menos intuitivamente, a idéia de entropia. O surgimento e a evolução da vida nega essa concepção. Em outras palavras, em sistemas abertos e em não-equilíbrio, existe uma tendência evolucionária contrária à tendência inexorável da perda de capacidade de realizar trabalho da energia, até atingir o equilíbrio termodinâmico (CECHIN, 2008).

Essa contradição foi atenuada por Schrodinger¹⁵⁰ (1944) que explicou que, para aumentar sua organização, é necessário importar energia¹⁵¹ e exportar entropia, aumentando a entropia nas vizinhanças (CECHIN, 2008).

Ainda, Ilya Prigogine¹⁵² (1955) em seus estudos sobre sistemas abertos, fora do equilíbrio termodinâmico e dinâmico, mostrou que há a atuação de estruturas dissipativas, que mantêm um padrão de organização graças a um fluxo entrópico, degradando energia e ciclando os materiais, caminhando no sentido da maior complexidade à medida que exportam entropia para seu entorno (CECHIN, 2008). Assim, considerando um horizonte maior e a hierarquização dos sistemas, o produto total do processo é sempre o aumento da entropia, de uma forma ou de outra.

James Clerk Maxwell, no final do século XIX, já divagava sobre a possibilidade de geração de entropia negativa - ou neguentropia¹⁵³, por meio de sua abstração metafórica

¹⁵⁰ SCHRODINGER, E. What is life? The physical aspect of the living cell. Cambridge University Press, 1944.

¹⁵¹ Chamada por Schroedinger de entropia negativa (CECHIN, 2008).

¹⁵² PRIGOGINE, I. Thermodynamics of irreversible processes. New York: John Wiley and Sons, 1955.

¹⁵³ Neguentropia, ou negativa da entropia, é uma magnitude ou função que quantifica a redução da entropia do fluido de trabalho (SANTOS, 2009).

conhecida como demônio de Maxwell, ser que seria capaz de controlar fluxos de relativamente alta energia, internos ao sistema, com um baixo dispêndio de energia, no sentido de produzir estados de baixa entropia em sistemas não isolados (PEREIRA JR; ROCHA, 2000).

Volchan e Videira (2001) afirmam que, para Maxwell, a segunda lei da termodinâmica não é necessariamente válida na escala microscópica. Neste sentido, Pereira Jr. e Rocha (2000) afirmam que em processos chamados de informacionais¹⁵⁴, tal hipótese seria realmente adequada. As enzimas e os ácidos nucleicos como o RNA e o DNA, por exemplo, poderiam agir como demônios de Maxwell, permitindo um "direcionamento muito preciso de fluxos de alta energia entre moléculas específicas" (PEREIRA JR.; ROCHA, 2000), introduzindo ordem ou neguentropia. Branco (1989) afirma que esta questão é o fundamento da teoria dos sistemas: "a ordem gerando novas propriedades para o todo" (BRANCO, 1989, p.51).

Retornando às relações entre os sistemas econômico e ambiental, há um evidente atrito entre as visões do processo produtivo pela ortodoxia econômica e a economia ecológica. Embora autores como Georgescu-Roegen (1971), Prugh *et al* (1999), Daly e Farley (2004) e Muller (1999) afirmem veementemente que o processo econômico é eminentemente entrópico¹⁵⁵, a literatura econômica tradicional insiste em mostrar que o processo econômico ocorre independentemente de qualquer *input* de recursos de baixa entropia.

Beinhocker (2006) lembra que a teoria econômica tradicional, a partir da escola marginalista e suas sucessoras - e inclusive a visão dominante atual, incorrem numa classificação errônea da economia, já que o sistema econômico não é um sistema fechado em equilíbrio, mas sim um sistema complexo adaptativo, e que a segunda lei da termodinâmica é uma lei física geral que não pode, em hipótese alguma, ser negligenciada.

¹⁵⁴ De acordo com Pereira Jr. e Rocha (2000), "processo informacional é um tipo de processo em que a quantidade de energia envolvida pode tender a zero, ou seja, tal quantidade não constitui um aspecto relevante do processo; mais importante são os efeitos que tal processo têm no controle organizacional dos sistemas".

¹⁵⁵ Ou seja, se dá em um único sentido, da transformação de recursos de baixa entropia em produtos e resíduos de alta entropia (SINISGALLI, 2005).

Ainda, pensando numa possível linha de argumentação em defesa do raciocínio econômico tradicional, Beinhooker (2006) afirma que mesmo que a economia seja um fenômeno social, não é possível analisá-la de maneira abstrata, já que todo o processo econômico é constituído por matéria, energia, informação e pessoas que, obviamente, estão sujeitas às leis da física.

Neste sentido, para adequar a questão da definição dos processos econômicos como entrópicos ou não, é necessário retomar uma questão já discutida no capítulo 1: o sistema econômico pode ser considerado como um sistema isolado? Daly e Farley (2004) observam que, para a economia ecológica, a economia é vista como um subsistema aberto inserido num sistema maior e finito que, embora seja aberto à energia solar, é materialmente fechado¹⁵⁶ – o que eles chamam de “*Sistema Terra*”.

Daly e Farley (2004) afirmam que, considerando “a macroeconomia como uma parte de um todo maior, o seu crescimento físico rouba outras partes do todo que é finito e não crescente, exigindo o sacrifício de algo, um custo de oportunidade”. Ou seja, o processo produtivo econômico exporta entropia para as vizinhanças, ou para o sistema maior do qual faz parte. Ainda, a economia não pode ser o todo, pois ela depende de entradas, de uma base física para a produção (DALY; FARLEY, 2004).

Desta forma, os autores (op. cit.) sustentam que o processo de crescimento econômico não é gratuito, que existe um custo que é relacionado com a depleção dos benefícios tangíveis e intangíveis constituídos pelo capital natural, conforme discutido no capítulo anterior. Mais do que isso, Daly e Farley (2004) afirmam que existe uma escala ótima da relação entre o crescimento econômico e a manutenção dos elementos do capital natural e que, a partir deste ponto, há o que eles chamam de crescimento não-econômico.

O crescimento do subsistema econômico¹⁵⁷ além da escala ótima expõe um claro *trade-off* entre o aumento dos benefícios proporcionados pelos serviços econômicos *versus*

¹⁵⁶ Daly e Farley (2004) afirmam que, “na Terra, a regra básica é: a energia flui e o material circula”.

¹⁵⁷ Daly e Farley (2004) defendem esse aumento do tamanho do subsistema econômico através da perspectiva de uma *economia de mundo vazio* para uma *economia de mundo cheio* onde, no primeiro caso, o ambiente não é escasso e o custo de oportunidade da expansão é insignificante.

a diminuição do bem-estar proporcionada pelas diversas dimensões inerentes ao conceito de capital natural (DALY; FARLEY, 2004).

Neste sentido, Beinhocker (2006) afirma que toda a riqueza - e aqui está claro que o autor está tratando o conceito de riqueza apenas sob a ótica do capital produzido - é criada por meio de processos termodinâmicos irreversíveis, já que o ato de criar riqueza é, em última instância, o ato de criar a ordem, embora nem toda a criação de ordem possa ser considerada criação de riqueza (BEINHOCKER, 2006).

A consideração de todas essas questões implica na aceitação de que existe uma limitação de matéria/energia de baixa entropia disponível para a viabilização dos processos produtivos, e que atividade econômica, por si, exporta materiais/energia de alta entropia.

Por fim, é oportuno fazer a conexão entre os conceitos termodinâmicos ora tratados e o conceito de exergia, abordado no capítulo 3. Kaberger e Mansson (2001) afirmam que há uma relação direta entre a exergia e a entropia de um sistema. Grosso modo, um sistema possui níveis mais altos de exergia quando a entropia é baixa. Quando a entropia é máxima, não há energia útil livre fluindo no sistema e, portanto, a exergia é mínima (KABERGER; MANSSON, 2001).

O grande argumento contrário a qualquer imposição de limitação à continuidade do crescimento econômico - inclusive da emergente Economia Verde - está fortemente baseado na crença do progresso tecnológico como solução para a questão da depleção do capital natural, tanto na via da exploração quanto na via da exportação de resíduos de alta entropia ou, nos termos adotados até aqui, para minimizar a diminuição da exergia total do sistema ambiental. Tais argumentos serão tratados nos tópicos que seguem.

4.2 Progresso tecnológico

Conforme discutido no capítulo 2, algumas das teorias de crescimento econômico com maior impacto na definição de políticas macroeconômicas optam pela desconsideração da variável ambiental sob o argumento da superação de qualquer limitação através do progresso tecnológico contínuo e cada vez mais rápido e intenso. Desta forma, é importante enquadrar adequadamente tal linha de pensamento à luz de todo o exposto no tópico anterior e nos capítulos que antecederam ao presente.

Definir progresso tecnológico ou mesmo tecnologia, mesmo inseridos apenas no contexto econômico, requer alguns cuidados. Rosenberg (2006) afirma que mesmo se a tecnologia fosse reduzida ao sentido estrito de *equipamentos*, excluindo os fatores organizacionais, institucionais e gerenciais inerentes ao conceito, o universo de possibilidades ainda seria desconcertantemente grande e ofereceria grandes dificuldades de classificação.

Pessoa (2003) afirma que, mesmo dentro da teoria do crescimento econômico, não existe um conceito de tecnologia aceito consensualmente pelos teóricos do tema. O autor (op. cit.) lembra que, por exemplo, Solow e DeLong enfatizam a produtividade dos fatores de produção, enquanto Romer, Anghion e Howitt se concentram na questão da produção de ideias comercializáveis.

Porém, é essencial entender como a tecnologia, ou melhor, o progresso tecnológico, pode influenciar o processo produtivo e a economia como um todo¹⁵⁸.

Jones (2000) afirma que, sob uma ótica mais específica, tecnologia pode ser conceituada como a maneira como insumos são transformados em produto no processo produtivo. Ainda, Rosenberg (2006) estabelece que o progresso técnico ou tecnológico, embora amplo e multifacetado, poderia ser reduzido a “certos tipos de conhecimentos que

¹⁵⁸ Rosenberg (2006) afirma veementemente que o desenvolvimento de novos produtos (que engloba mudança em processos) é condição para o crescimento rápido e continuado.

tornam possível produzir, a partir de uma quantidade de recursos um maior volume de produto ou um produto qualitativamente superior”.

Ainda neste sentido, Rosenberg (2006) observa que o progresso tecnológico deve ser considerado a partir de duas vertentes. A primeira relacionada à visão de processo, com vistas à redução de custos ou ao ganho na produtividade, para a produção de um produto inalterado. Essa vertente prioriza os aspectos quantitativos do processo produtivo. Há, porém, uma segunda vertente, também muito importante dentro do contexto do crescimento econômico, que é a relacionada à inovação, ou mais especificamente, à inovação de produto (ROSENBERG, 2006).

Beinhocker (2006) afirma que a tecnologia é parte fundamental da evolução da economia e da criação de riqueza. Neste sentido, o autor sugere, apoiado na teoria de Nelson¹⁵⁹ (2003), sua decomposição em três processos interconectados que seriam os responsáveis por essa evolução: o desenvolvimento de tecnologia física, de tecnologia social e dos negócios. Os negócios seriam responsáveis pela fusão dos dois tipos de tecnologia e representá-la em termos de produtos e serviços para o mercado.

No contexto das teorias do crescimento econômico, a questão do progresso tecnológico via de regra aparece como a solução necessária para a eliminação da tendência de retornos decrescentes dos produtos no nível agregado (SILVA-FILHO; CARVALHO, 2001). Porém, é importante lembrar que o pensamento que embasa tal relação está ainda muito fortemente vinculado aos modelos neoclássicos, que optam por uma representação muito frágil da relação entre os fatores de produção e a tecnologia. Mankiw (2001) representa exatamente esta visão absurdamente simplificadora, quando afirma que "à medida que a tecnologia de aperfeiçoa (...), a economia produz mais a partir de qualquer combinação dada de insumos".

É possível identificar claramente nesta abordagem tradicional duas questões importantes no enquadramento da tecnologia dentro do processo de crescimento: o papel central da tecnologia e a relação entre os fatores de produção. Tais questões são pontos

¹⁵⁹ NELSON, R. R. Physical and Social Technologies and their evolution. Working paper series. Columbia University, 2003.

importantes para as discussões sobre as relações do sistema econômico - e sua tendência de crescimento ilimitado de longo prazo - e o sistema ambiental, considerando a inserção das leis da termodinâmica.

Partindo da questão do papel do progresso tecnológico dentro do processo de crescimento, e da sua relação com a qualidade ambiental, é importante destacar o pensamento de Robert Solow como o maior representante da visão tradicional ligada ao chamado otimismo tecnológico.

Desde o início da década de 1970, Robert Solow vem discutindo, no bojo de suas teorias do capital, do crescimento econômico e dos recursos naturais, o conceito de sustentabilidade do ponto de vista econômico (MUELLER, 2005). Todo o argumento que respalda essa visão - de Solow e de seus seguidores, ou praticamente toda a base do *mainstream* econômico - está apoiado em três hipóteses, conforme Domingos (1998):

Progresso tecnológico permite extrair cada vez mais actividade económica por unidade de produto natural, sugerindo que este aumento de produtividade dos recursos leva, tendencialmente, a um desacoplamento entre a actividade económica e o impacto ambiental;

A evolução tem mostrado que se descobrem continuamente novos recursos não renováveis e outros se irão descobrir se o aumento de preço justificar a sua procura;

Pode reduzir-se a quantidade de resíduos reciclando-os e impedindo que os mais nocivos saiam do sistema económico. (DOMINGOS, 1998, p.14)

De fato, estas três hipóteses podem ser consideradas como o cerne do pensamento econômico vigente, atualmente personificada na chamada Economia Verde. Embora conceitualmente ainda muito frágil em relação à definição, é possível afirmar com segurança que a Economia Verde está intimamente vinculada à ideia da superação das limitações ambientais através do aumento cada vez maior da eficiência tecnológica. Uma possível definição de Economia Verde, e talvez a mais aceita, associa o conceito a um sistema econômico menos intensivo em carbono, que adote um uso racional dos recursos naturais e considere a questão da inclusão social (FBDS, 2012).

É importante também, no contexto do chamado otimismo tecnológico, abordar mesmo que brevemente duas hipóteses ainda muito difundidas, embora crivadas de problemas conceituais e metodológicos: a hipótese da Curva Ambiental de Kuznetz e a Hipótese do Desacomplamento.

Adaptado do estudo original de Kuznets¹⁶⁰ sobre a influência do crescimento econômico sobre a desigualdade de renda, a hipótese da Curva Ambiental de Kuznets refletiria a relação entre a qualidade ambiental e a riqueza acumulada. O modelo EKC¹⁶¹ afirma que, nas primeiras etapas do processo de crescimento econômico, a intensificação dos processos produtivos e a elevação na renda implicam em maiores níveis de degradação ambiental, porém, a taxas marginalmente decrescentes (CAVIGLIA-HARRIS *et al.*, 2009).

Apenas após atingir um determinado limiar de capital acumulado – o *turnning-point*, a relação entre o crescimento econômico e degradação ambiental passa a ser negativamente correlacionada, e essa diminuição gradual dos níveis de degradação ambiental ao longo do processo de crescimento seria resultado de fatores como mudanças na estrutura de preferência dos consumidores, o surgimento de novas tecnologias e alterações nos processos produtivos e econômicos, especificamente uma mudança na composição dos bens e serviços ofertados (KAMOGAWA, 2008).

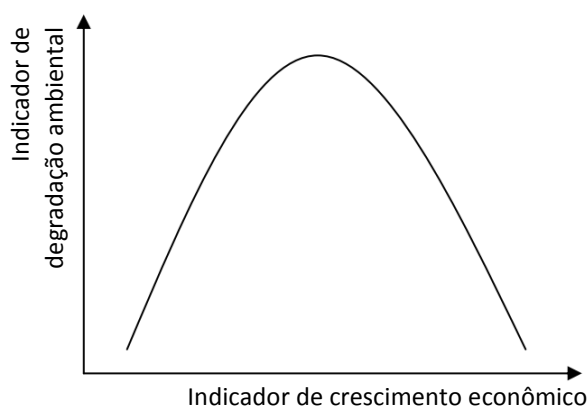


Figura 14 - Environmental Kuznets Curve.
Fonte: Selden e Song (1994)

¹⁶⁰ KUZNETS, S. Economic Growth and Income Inequality. American Economic Review, v.45, n.1. 1955

¹⁶¹ Environmental Kuznets Curve, inicialmente sugerido por Shafik e Bandyopadhyay (1992) e Grossman e Krueger (1993).

A inversão da trajetória positivamente inclinada para uma negativamente inclinada, de acordo com Selden e Song (1994), estaria relacionada à elasticidade da renda positiva para qualidade ambiental, ou seja, conforme aumenta a renda, as pessoas tendem a demandar mais qualidade ambiental (LUCENA, 2005). Essa mudança também estaria associada a maiores níveis de educação e conscientização das consequências da atividade econômica sobre o ambiente e à viabilização de sistemas políticos mais abertos (SELDEN; SONG, 1994), democráticos e participativos.

O comportamento da EKC indicaria a existência de três efeitos do crescimento sobre o ambiente: a) o efeito escala, ou o aumento da pressão ambiental proporcional ao aumento da escala da economia; b) o efeito composição, ou o aumento da renda per capita alterando a estrutura do processo produtivo, orientado para processos intensivos em serviços, ou seja, quanto mais rico um país, mais “limpa” seria a composição do PIB e; c) efeito tecnologia, ou a maior disponibilidade de recursos para pesquisa e desenvolvimento tecnológico, visando processos produtivos mais eficientes (SASAHARA, 2009). Nos primeiros momentos do crescimento econômico, conforme os pressupostos da EKC, o efeito escala prevalece. Após atingir um determinado nível de acumulação de capital, os efeitos composição e tecnologia compensariam o efeito escala, o que possibilitaria o formato de “U” invertido apresentado pela curva (MUELLER, 2007; SASAHARA, 2009).

De uma forma mais geral, a hipótese da EKC remete à superação dos problemas ambientais ao próprio crescimento econômico (SASAHARA, 2009). Essa hipótese é alvo de críticas severas em relação a questões conceituais e metodológicas (VEIGA, 2005; DINDA, 2004; CECHEIN, 2008). A principal crítica, porém, está relacionada à delimitação das fronteiras do objeto de análise. Embora o crescimento econômico possa ser mensurado nacionalmente, o mesmo parâmetro não se aplica à degradação ambiental. Ainda, a degradação ambiental de que trata o modelo está relacionada ao controle de poucos poluentes, e não ao capital natural como um todo. Ou seja, a lógica adotada pelo modelo aceita os elevados custos de curto prazo com a esperança nos possíveis benefícios de longo prazo. Tal premissa desconsidera todas as incertezas associadas à complexidade inerente ao sistema ambiental, inclusive à criticidade do capital natural.

Neste sentido, outra fonte de críticas importante sobre a teoria da EKC é a natureza cumulativa de algumas perturbações sobre determinados ambientes, que poderiam resultar no deslocamento do estado de equilíbrio do ambiente para outra bacia de atração, rompendo o limiar de resiliência do sistema, tornando muito mais difícil o retorno ao estado original, quando este retorno for possível. Desta forma, em situações onde o ambiente exhibe fenômenos de histerese, a aplicação da hipótese da curva ambiental de Kuznets também não encontra respaldo, mesmo que apenas conceitualmente (RANJAN; SHORTLE, 2007).

Da mesma forma, a questão do desacoplamento¹⁶² é, segundo Jackson (2009), a resposta convencional para o dilema do crescimento e, baseada na premissa que as saídas do processo econômico serão, progressivamente, menos dependentes de processamentos de material, a economia poderia continuar a crescer sem ultrapassar os limites ecológicos.

Bartelmus (2002 apud TANIMOTO, 2010) tratando do mesmo conceito com o termo “desmaterialização”, explica que o mesmo foi proposto para nomear os esforços realizados no sentido de reduzir a exploração material e assim conseguir manter o consumo de recursos naturais em níveis toleráveis, pautada na estratégia da diminuição do fluxo de matéria-prima no processo produtivo e sua acumulação na sociedade, bem como na minimização da produção de resíduos e substâncias tóxicas. Essas ações levariam ao aumento da produtividade (em relação aos insumos). A mensuração do sucesso desta estratégia se dá através da implementação do conceito de ecoeficiência, definida como a razão entre a taxa de riqueza gerada, normalmente expressa pelo PIB, e o uso de recursos naturais, expresso pela DMT – Demanda de material total¹⁶³ (TANIMOTO, 2010).

Todas estas hipóteses, como se vê, estão intimamente vinculadas à crença no progresso tecnológico como meio de manutenção da relação existente entre os sistemas econômico e ambiental. Progresso tecnológico e aumento da eficiência são vistos como sinônimos. Há, porém, questões de fundo que precisam ser consideradas para um enquadramento mais adequado dessa relação.

¹⁶² *Decoupling*, em inglês.

¹⁶³ Em inglês TMR – *Total Material Requirement*.

Uma dessas questões é o chamado efeito *rebound* que, segundo Binswanger (2001), pode ser explicado como o descolamento entre o aumento da eficiência tecnológica e a diminuição do uso de recursos do capital natural, por meio de efeitos indiretos. Ou seja, mesmo com tecnologias muito mais eficientes na utilização de recursos naturais, ou no processamento, com menores níveis de resíduos, ainda sim é possível notar um aumento nos impactos sobre o capital natural. Tal efeito pode estar relacionado a respostas comportamentais, com o incentivo ao aumento do consumo em escala. Há ainda uma relação de *feedback* positivo muito forte entre esse aumento em escala nos níveis de consumo e a definição das estratégias das empresas no sentido do crescimento de sua produção, tornando o efeito cada vez mais intenso. Binswanger (2001) afirma que o efeito *rebound* é um fenômeno muito relevante, porém frequentemente negligenciado nas discussões sobre sustentabilidade.

KPMG¹⁶⁴ (2012) valida a força do efeito *rebound*, embora não utilize explicitamente o termo, com dados sobre um vertiginoso aumento absoluto no uso de recursos do capital natural associado ao aumento significativo da eficiência tecnológica. De acordo com o estudo, no período de 1990 a 2011, foi possível mensurar um decrescimento de 23% nas emissões de CO₂ para cada unidade do PIB mundial, além de um decréscimo de 21% na intensidade do uso de recursos materiais. Porém, em termos absolutos, houve um aumento desproporcional na depleção do capital natural, com um crescimento de 41% na extração total de materiais, de 27% no consumo per capita de recursos naturais, e de 39% nas emissões totais de CO₂, além da intensificação de 28% na pegada ecológica global (KPMG, 2012).

Ou seja, considerando que há uma limitação nos estoques e fluxos de capital natural, e ainda que toda atividade de transformação implique na incidência da segunda lei da termodinâmica, que estabelece um limite intransponível para o aumento da eficiência tecnológica, é possível afirmar que pensar sustentabilidade apenas a partir da ótica tecnológica é um equívoco. Embora exista muito espaço para as necessárias melhorias nos processos produtivos, balizar o planejamento econômico e a sustentabilidade - como

¹⁶⁴ A KPMG é uma rede global de firmas-membro que atua como consultora em serviços de *audit, tax* e *advisory* (KPMG, 2012).

estabelece a chamada Economia Verde, apenas por meio da questão tecnológica, revela a desconsideração, ou a ignorância, de uma visão mais abrangente do processo econômico, e de todos os efeitos indiretos, e às vezes adversos, inerentes à sua dinâmica.

4.3 Sustentabilidade(s) e o "*Interest in between*"

Considerando todos os elementos expostos até então, já é possível delimitar o conceito - ou melhor, os conceitos - de sustentabilidade, este entendido como o principal referencial teórico na mediação das relações entre os sistemas econômico e ambiental. Amazonas (1994) lembra que, desde os primórdios da consideração da questão ambiental, no final dos anos 60 e início dos anos 70, a ideia de sustentabilidade começa a adquirir uma importância crucial como um tema central no balizamento das relações entre as atividades humanas e a degradação ambiental.

De uma maneira geral e ainda desprovida de maiores inclinações ideológicas ou conceituais, Amazonas (2001) afirma que sustentabilidade pode ser entendida como a manutenção de certos elementos constantes. Sustentabilidade, assim, pode ser vista como um esforço para a sobrevivência ou persistência de um sistema, em condições iguais ou superiores ao estado original. Há, desta forma, uma relação muito próxima com os conceitos de resiliência e estabilidade abordados no capítulo 3.

A construção do conceito de sustentabilidade passa pela definição de quais elementos ou sistemas devem ser mantidos constantes. Essa definição pode ser considerada como o ponto crítico de inflexão na evolução das abordagens que tratam da relação entre os sistemas econômico e ambiental, com leituras bastante distintas a partir deste conceito. É importante, neste sentido, construir uma breve síntese histórica sobre estas diferentes abordagens.

Os primeiros passos no sentido de institucionalização do tema ambiental dentro das ciências econômicas ocorreram no próprio seio do pensamento tradicional vigente, como

uma tentativa de dar respostas às já evidentes questões ambientais que se colocavam. Inserida e gestada dentro do pensamento neoclássico, a chamada Economia Ambiental pode ser considerada a primeira abordagem instituída para a avaliação do tema (CECHIN, 2008; AMAZONAS, 2001).

Neste contexto, para a teoria neoclássica, a sustentabilidade possui um objetivo muito claro e bem definido: o que se deve manter constante é o consumo *per capita* (CECHIN, 2008). A manutenção do consumo *per capita* constante, ou em condições superiores, está fundada na equidade intergeracional da utilidade proposta por Solow (1974), conhecida como *Critério de Solow* (AMAZONAS, 2001). Mueller (2005) afirma que a sustentabilidade, neste sentido, deve ser encarada como uma diretriz para que o atual padrão de vida não comprometa os níveis de bem-estar econômico das gerações futuras. O bem-estar definido por Solow, porém, parte de uma análise estreita baseada apenas na capacidade produtiva e no consumo. De fato, Solow (1993), afirma textualmente este ponto de vista: "If 'sustainability' is anything more than a slogan or expression of emotion, it must amount to an injunction to preserve productive capacity for the indefinite future" (SOLOW, 1993, p. 163).

Solow, segundo Mueller (2005), entende que os níveis de bem-estar social também são afetados pelo estado do ambiente - mesmo que sua concepção de ambiente esteja vinculada apenas aos recursos naturais utilizados para as atividades econômicas¹⁶⁵ - assim como pelos produtos do progresso tecnológico acumulado. O desenvolvimento desta linha de raciocínio leva ao ponto principal de ruptura nas discussões sobre a sustentabilidade. Para Solow, a depleção dos recursos naturais pode ser totalmente compensada pelo desenvolvimento do capital produzido. Ou seja, Solow admite a plena substituição entre os fatores de produção, e o que importa é a viabilização dos estoques de capital total (AMAZONAS, 2001; MUELLER, 2005).

Dentro desta lógica, mesmo considerando a variável ambiental dentro do processo de criação de riqueza, o modelo admite que este possa ser declinante ou mesmo exaurível, desde que este declínio seja contrabalanceado por um acréscimo proporcional ou mais que

¹⁶⁵ O conceito amplo de capital natural não é considerado por Solow.

proporcional de capital reprodutível, perpetuando a capacidade de produzir da economia (AMAZONAS, 2001). Ou seja, é plausível considerar a base de recursos naturais como ilimitada em razão da sua relação com o progresso técnico e científico (COSTANZA, 1994).

Esta visão de sustentabilidade, que prevê a plena substitutibilidade entre o capital natural e outras formas de capital é associada ao conceito de "Sustentabilidade Fraca" ou, como lembra Neumayer (2003), "Sustentabilidade Solow-Hartwick"¹⁶⁶.

Esta leitura do conceito de sustentabilidade encontrou terreno fértil dentro da ortodoxia econômica. Primeiro por possibilitar preservar a frágil estrutura e lógica da função de produção neoclássica, possibilitando a manutenção dos principais modelos de crescimento econômico. Segundo, por viabilizar o *status quo* das políticas macroeconômicas, compatibilizando pressões ambientais - através do enquadramento do conceito de sustentabilidade - com a manutenção do processo de crescimento econômico.

É importante, porém, resgatar as origens dessa visão neoclássica da relação entre economia e ambiente, principalmente por meio das chamadas economia da poluição e economia dos recursos naturais.

Já em 1920, Arthur Cecil Pigou propunha o estabelecimento de taxas e impostos com o objetivo de neutralizar os danos dos custos externos – as externalidades – entre elas os danos ambientais de origens diversas, lançando as bases do princípio do poluidor-pagador (SILVEIRA, 2006) e da chamada Economia da Poluição.

No contexto da Economia dos Recursos Naturais, é importante destacar o trabalho de Harold Hotelling (1931), com pressupostos pautados no entendimento da utilização dos recursos naturais¹⁶⁷ essencialmente como um problema de alocação intertemporal, uma vez que um estoque de recurso natural pode ser extraído hoje ou preservado para extração futura (AMAZONAS, 2002). Segundo Carvalho (2003), esse problema da alocação ótima

¹⁶⁶ John Hartwick, que desde 1977, com o trabalho "Intergenerational Equity and the investing of rents from exhaustible Resources". *American Economic Review*, 67, 972-974, 1977, é considerado um defensor ardoroso da ideia da substitutibilidade entre recursos naturais e o capital produzido.

¹⁶⁷ A abordagem de Hotelling foi pautada na avaliação de recursos naturais exauríveis, exclusivamente.

incorporaria dois mecanismos de adequação temporal, o custo de oportunidade e a taxa de desconto.

Ambas as linhagens teóricas – a Economia da Poluição e a Economia dos Recursos Naturais, de essência neoclássica, recepcionadas e hoje inseridas no contexto da chamada Economia Ambiental, compartilham de características similares, como a visão utilitarista e estática¹⁶⁸ do ambiente, cuja relação com os sistemas produtivos poderia ser equilibrada através do avanço tecnológico e da internalização dos custos sociais pela valoração ambiental (AMAZONAS, 2001).

Retornando para a questão da sustentabilidade fraca, também é importante ressaltar a distância das principais premissas adotadas em relação à realidade econômica. Essa questão era um dos pontos centrais da crítica do próprio Georgescu-Roegen em relação ao *modus operandi* da ciência econômica tradicional que, segundo ele, estava pautada na "irrealidade da formulação matemática da função de produção, desrespeitando o preceito básico da ciência da correspondência dos símbolos com a realidade" (CECHIN; VEIGA, 2010). Neste sentido, uma das fragilidades da função de produção neoclássica é a ausência de elementos que evidenciem as transformações qualitativas que ocorrem em decorrência das mudanças quantitativas nos insumos e produtos (CECHIN; VEIGA, 2010), ou mesmo assumir que as relações entre os fatores de produção e os impactos no bem-estar social são lineares e diretas.

Uma visão diferente da sustentabilidade, porém, foi desenvolvida, em contraste com o conceito de sustentabilidade fraca, pautado principalmente na relação entre os fatores de produção. A chamada "Sustentabilidade Forte", ao contrário da sua contraparte neoclássica, considera o capital natural e o capital reprodutível como complementares e não substitutos (BRAND, 2009).

A hipótese da complementaridade parte da premissa que não existem substitutos para os componentes do capital natural, principalmente em razão de suas funções básicas

¹⁶⁸ Estática por não considerar a dinâmica intertemporal e intergeracional da relação com as dinâmicas, processos e elementos do sistema ambiental, conforme discutido no capítulo 3, e suas relações mais amplas com o bem-estar social.

que extrapolam o sistema econômico, impondo uma restrição absoluta à expansão deste (ROMEIRO, 2003).

England (2000) afirma que não há evidência empírica disponível que confirme ou descarte a hipótese da complementaridade, mas que existem duas razões para aceitá-la. A primeira é o fato de que o trabalho humano e os bens de capital produzidos são agentes transformadores, que processam fluxos de energia e matéria e tornam disponíveis produtos acabados, ou seja, é necessário considerar o fluxo de entrada em qualquer processo de transformação e o capital natural é a fonte desses fluxos essenciais. O segundo está amparado pela pesquisa ecológica, principalmente na consideração da ampla gama de benefícios que o ambiente provê à humanidade (ENGLAND, 2000).

Neste contexto está inserida a Economia Ecológica que, segundo Amazonas (2001), tem por propósito “a análise do funcionamento do sistema econômico tendo-se em vista as condições do mundo biofísico sobre o qual este se realiza”. Costanza (1994), complementando, afirma que o principal objetivo da Economia Ecológica é a manutenção da sustentabilidade dos sistemas econômicos e ecológicos, entendendo o primeiro como um subsistema do segundo. Ainda, Common e Stagl (2005) definem Economia Ecológica como o estudo das inter-relações entre os sistemas humanos, ou econômicos, e os sistemas ecológicos. Martinez Alier (2007) afirma que a economia ecológica proporciona uma visão sistêmica das relações entre a economia e o meio ambiente, considerando esse último como finito. Common (1995) lembra também que a primeira edição do periódico *Ecological Economics*, de 1989, tratou especificamente da contextualização da Economia Ecológica¹⁶⁹, e considerou a sustentabilidade como seu grande objeto de estudo.

No contexto do embate entre os conceitos de sustentabilidade fraca e forte, um ponto fundamental que merece destaque é a questão do adequado enquadramento do conceito de capital natural. A adoção do conceito apresentado no capítulo 3, baseado em Brand (2009), torna inviável qualquer abordagem em relação à sustentabilidade que desconsidere as fortes e complexas relações dos elementos e processos do capital natural com o bem-estar social e o próprio processo econômico. As funções e os serviços

¹⁶⁹ Os artigos que compunham a edição estavam pautados na pergunta: *What is ecological economics to be about?*

ecossistêmicos não podem ser substituídos por outras formas de capital. Além do mais, a própria questão da plena substituição de meros recursos naturais materiais por capital produzido simplesmente desconsidera a lei da entropia, ou seja, mesmo que um produto manufaturado possa responder a demandas socioeconômicas, substituindo um recurso natural, há um custo energético que não está inserido no cálculo, já que não existe processo transformador que não implique em perdas e resíduos.

Para além da questão da consideração do capital natural, Veiga (2003) busca outra relação de antagonismo em relação à sustentabilidade. Segundo o autor, este debate pode ser sumarizado a partir da consideração de duas teses extremas: o ultraotimismo tecnológico de Solow¹⁷⁰ e o fatalismo entrópico de Georgescu-Roegen.

Como já visto, para Solow não há nenhuma forma de limitação imposta pelo sistema ambiental que não possa ser completamente superada por meio do progresso tecnológico contínuo, com a manutenção da capacidade produtiva. Já para Georgescu-Roegen, nada pode ser mais rígido e determinante do que a segunda lei da termodinâmica e, desta forma, crescimento econômico é sempre depleção¹⁷¹ e consequentemente, implica na redução da expectativa de vida da espécie humana (VEIGA, 2003), mesmo que a longo ou longuíssimo prazo.

Stiglitz (1997) aborda este dualismo justamente através da ótica temporal. De acordo com o autor, os modelos analíticos historicamente elaborados pela economia tradicional consideram apenas o médio prazo, com um horizonte de 50 a 60 anos¹⁷², prazo onde o crescimento econômico pode ser sustentável e pode ocorrer uma substituição satisfatória entre recursos naturais e outras formas de capital. A própria questão do progresso tecnológico adquire outro peso, com a melhoria da eficiência dos processos produtivos. De fato, a compatibilização entre as respostas de médio, longo e longuíssimo prazos, neste sentido, pode ser considerada também um dos nós críticos na análise da sustentabilidade.

¹⁷⁰ Veiga (2003) se refere à esta visão pelo caricatural termo "Fábula Panglossiana".

¹⁷¹ Para Georgescu-Roegen, questões como uma econômica de estado estacionário ou de crescimento zero são soluções ingênuas e incompatíveis com a consideração da entropia dentro dos processos econômicos.

¹⁷² Keynes é autor de uma célebre frase que ilustra bem essa opção pelo curto e médio prazos: " No longo prazo estaremos todos mortos".

No contexto destes dilemas e embates, Veiga (2003) lembra que, entre os pólos mais extremos, existem posições que "podem variar de A a Z". Essa afirmação obriga a retomada de um ponto apresentado no capítulo 1, no que tange às características próprias de sistemas complexos e ao interesse em situações intermediárias entre extremos.

É realmente interessante notar que a análise da questão da sustentabilidade a partir dos extremos leva sempre a respostas certas e determinadas, e que tais soluções são comumente consideradas como insatisfatórias ou parciais. Como lembra Beinhocker (2006), Miller e Page (2007) e Page (2009), o mundo real frequentemente orbita em cenários intermediários, onde os eventos ocorrem concomitantemente, e em diferentes escalas.

Neste sentido, retomando a estrutura de características fundamentais¹⁷³ definidas por Miller e Page (2007) e Page (2009), e assumindo claramente a posição de que o debate da sustentabilidade - esta entendida como o paradigma teórico adequado para tratar as relações entre os sistemas econômico e ecológico - deve necessariamente ser considerado através do prisma da complexidade, é importante reforçar o estudo e o debate em relação a cenários intermediários, ou que conciliem o melhor dos argumentos dos extremos. Ou pelo menos aqueles com mais contato com o mundo real.

Ampliando as discussões de Veiga (2003) sobre um possível caminho do meio entre as posições extremas personificadas por Solow e Georgescu-Roegen, e pensando em todas as propriedades e características de sistemas complexos adaptativos, seria factível pensar não em uma solução intermediária¹⁷⁴ entre os opostos, mas em possibilidades de composições entre os elementos dos sistemas e subsistemas, sempre em coevolução.

Neste sentido, quais as composições em relação ao progresso tecnológico contínuo, com a inserção da entropia em todos os processos produtivos poderiam levar a um cenário de maior sustentabilidade - tanto do capital natural como do bem-estar social - no médio, longo e longuíssimo prazos? Ainda, qual parcela do capital natural poderia ser substituída por capital produzido no curto e médio prazo sem comprometer a viabilidade das funções ecossistêmicas do capital natural total no longo e longuíssimo prazos? Ou mais, como

¹⁷³ Capítulo 1, tópico 1.2.

¹⁷⁴ Veiga (2003) apresenta a teoria da Economia do Estado Estacionário de Herman Daly como uma terceira via, menos radical e pessimista do que as ideias de Georgescu-Roegen.

mediar os impactos no bem-estar social no médio, longo e longuíssimo prazos, considerando as influências das parcelas referentes ao capital produzido e ao capital natural total?

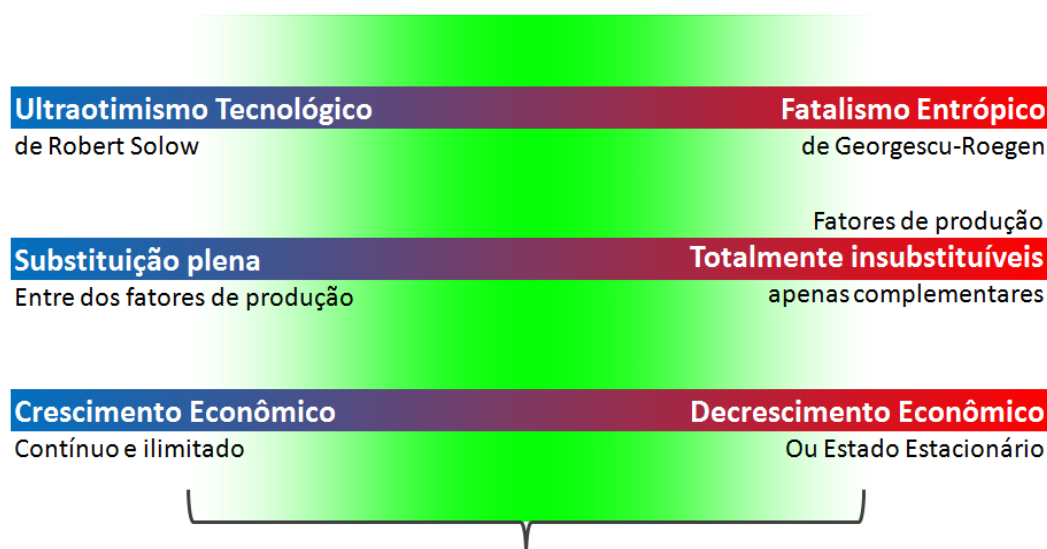


Figura 15 - Cenários intermediários entre posições extremas sobre a sustentabilidade

Até mesmo a escala ótima da relação entre o crescimento econômico e a manutenção dos elementos do capital natural prevista por Daly e Farley (2004) não é estática e universal, já que ambos os sistemas são dinâmicos e em coevolução. Ou seja, é provável que essa escala ótima exista em vários cenários diferentes, com composições completamente novas. Neste sentido, a sustentabilidade poderia ser associada a pontos muito específicos em uma paisagem de estabilidade extremamente dinâmica e movimentada.

Infelizmente, nenhuma dessas questões pode ser respondida de maneira direta, imediata e descontextualizada. Não há solução determinística possível e nenhum modelo matemático tem condições de oferecer qualquer resposta minimamente satisfatória.

Neste sentido, é oportuno inserir uma definição alternativa de sustentabilidade, muito mais próxima do conceito de sustentabilidade forte e da própria economia ecológica, que relaciona o conceito à propriedade de criar, testar e manter a capacidade adaptativa de um sistema (HOLLING, 2000). Tal definição, bem mais ampla, é interessante no sentido que rompe e extrapola a questão dos estoques de capitais, substituíveis ou não, possibilitando uma leitura conjunta da complexidade da relação entre os sistemas.

A modelagem de sistemas complexos, neste sentido, pode ser entendida como uma das poucas ferramentas com o potencial de oferecer análises e reflexões sobre o que pode ocorrer entre os extremos. A simulação, mesmo que estilizada e baseada em regras e comportamentos simples, tem muito mais a dizer da realidade do que quaisquer especulações teóricas ou malabarismos matemáticos e econométricos.

No capítulo 5 será realizado um exercício de modelagem baseada em agentes com o objetivo de ilustrar as possibilidades do enquadramento da sustentabilidade por meio do viés dos sistemas complexos.

O objetivo central deste capítulo é, através do exercício da modelagem baseada em agentes, inserir os temas e conceitos tratados nos capítulos anteriores e gerar subsídios para a reflexão da sustentabilidade em um cenário complexo. Desta forma, o modelo conceitual e as regras de evolução foram pensados de modo a permitir a simulação de uma vasta gama de cenários possíveis, como será tratado nos tópicos que seguem.

Inicialmente, porém, é oportuno salientar que o presente exercício não pretende ser entendido como um modelo de crescimento econômico, de maneira alguma. Questões fundamentais dentro de um modelo de crescimento econômico como a evolução tecnológica e as dinâmicas populacionais foram intencionalmente desconsideradas, visando manter o foco nos objetivos do trabalho, ou seja, os diversos comportamentos complexos do capital natural quando submetidos a diferentes níveis de pressão, e os impactos no sistema econômico.

Ainda, a modelagem do compartimento ambiental, que almeja inserir a questão do capital natural, o faz de maneira a simular os diferentes comportamentos possíveis, conforme apresentado no capítulo 3. Neste sentido, o capital natural simulado pelo exercício ora apresentado pretende representar os valores de um possível indicador holístico de resiliência ecossistêmica. Embora o atributo capital natural, dentro do modelo proposto, possa ser utilizado pelos agentes do sistema econômico como combustível para seus processos produtivos, inclusive assumindo condições de renovabilidade diferenciadas, sua variação deve conceber outras dimensões inerentes ao próprio conceito, como as funções e os serviços ecossistêmicos.

O modelo ora apresentado parte de uma concepção muito simples: o modelo predador-presa, que aqui terá a leitura adaptada para a relação sistema econômico - sistema ecológico. A partir deste ponto básico, ambos os compartimentos foram construídos, adequados e adaptados, considerando um conjunto de premissas específicas, que serão detalhadas a seguir.

Outro parâmetro que pautou a definição conceitual e estrutural do modelo foi a escolha do ambiente de programação. A linguagem Netlogo¹⁷⁵ foi adotada em razão de suas características e possibilidades no que se refere à simulação de fenômenos naturais e sociais complexos com evolução dinâmica (TISUE; WILENSKY, 2004; BLIKSTEIN; ABRAHAMSON; WILENSKY, 2005).

O Netlogo possui três tipos básicos de agentes: os *patches*, ou agentes que compõem o mundo bi-dimensional; os *turtles*, ou agentes que podem se mover dentro do mundo, sobre a malha de *patches*; e o observador, ou uma entidade que não possui uma localização específica, mas que visualiza todo o ambiente (DAMACEANU, 2008).

A seguir, serão apresentados cada um dos compartimentos do modelo, assim como suas premissas e a lógica de construção e implementação. Ao fim, serão apresentados os resultados das simulações, considerando os diferentes cenários e possibilidades.

5.1 Modelagem do Sistema Ambiental estilizado

Conforme dito anteriormente, dentro do sistema Netlogo, cada unidade do ambiente é composta por um *patch*, ou um agente fixo que pode possuir atributos e regras de evolução próprias. Todas as premissas, regras de composição e definição de comportamentos estão baseadas nesta unidade básica que, no conjunto, compõe o sistema ambiental estilizado do modelo.

¹⁷⁵ Sistema de autoria de Uri Wilenski e desenvolvido pelo *Center for Connected Learning (CCL) and Computer-Based Modeling*, ambos da Universidade de Northwestern (DAMACEANU, 2008; MCDONNELL, ZELLNER, 2011). O download pode ser realizado em <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

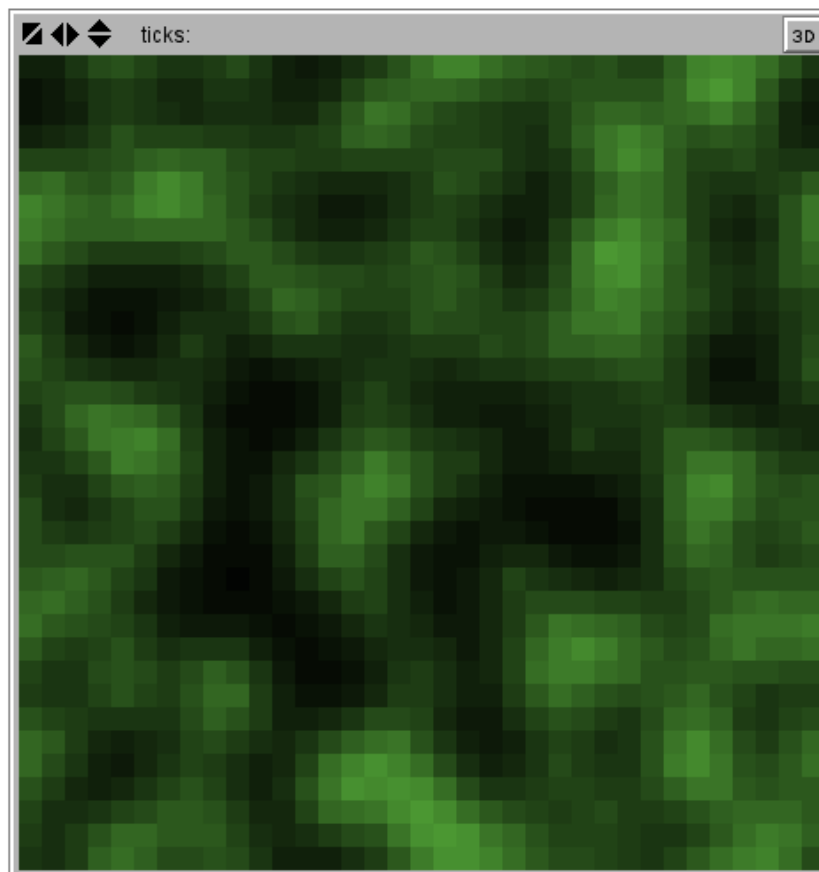


Figura 16 - Representação da malha de *patches* formando o mundo no modelo.

5.1.1 Premissas do compartimento Ambiental

A modelagem do compartimento ambiental segue algumas premissas básicas, elencadas a seguir:

- O capital natural é o atributo básico dos *patches*, e representam, de forma agregada e holística, a qualidade ambiental daquela unidade;
- O ambiente é essencialmente heterogêneo, ou seja, é formado por *patches* com valores de capital natural (kn) variados e distribuídos aleatoriamente;
- O ambiente possui uma dinâmica de regeneração natural, mediada por uma taxa de regeneração máxima;

- Quando submetidos a processos de depleção do kn, os *patches* podem seguir dois comportamentos: a depleção linear ou a depleção com ruptura. Tal premissa pretende inserir a questão da transição crítica de fase em ambientes com estados alternativos de equilíbrio e quebra da resiliência daquela unidade;
- A recuperação dos *patches*, da mesma forma, também pode seguir um comportamento linear ou um comportamento com histerese.

A seguir será apresentada toda a construção do compartimento ambiental do modelo, partindo da composição do ambiente e das regras para a definição do comportamento dos *patches*, sempre pautados nas premissas descritas.

5.1.2 Composição do ambiente

Baseado na premissa da heterogeneidade do ambiente em relação à distribuição do capital natural, cada *patch* possui um valor definido previamente. Esses valores, porém, são alocados em cada *patch* a partir da definição da qualidade ambiental total do mundo, que pode variar dentro de uma faixa de 20% a 85%¹⁷⁶. Esta qualidade ambiental total é definida inicialmente pelo operador, através de um controle do tipo *slider*, possibilitando simular vários cenários iniciais. Tal abordagem tem por objetivo simular o comportamento de ambientes com diferentes condições iniciais, e verificar como a alteração dessa variável interfere nas dinâmicas do modelo.

¹⁷⁶ Em um cenário de qualidade ambiental total inicial de 85%, por exemplo, a soma de todos os valores do capital natural de todos os *patches* atingirá 85% do valor total do ambiente, ou da soma de todos os *patches* em sua capacidade máxima em relação ao atributo capital natural - 100%.

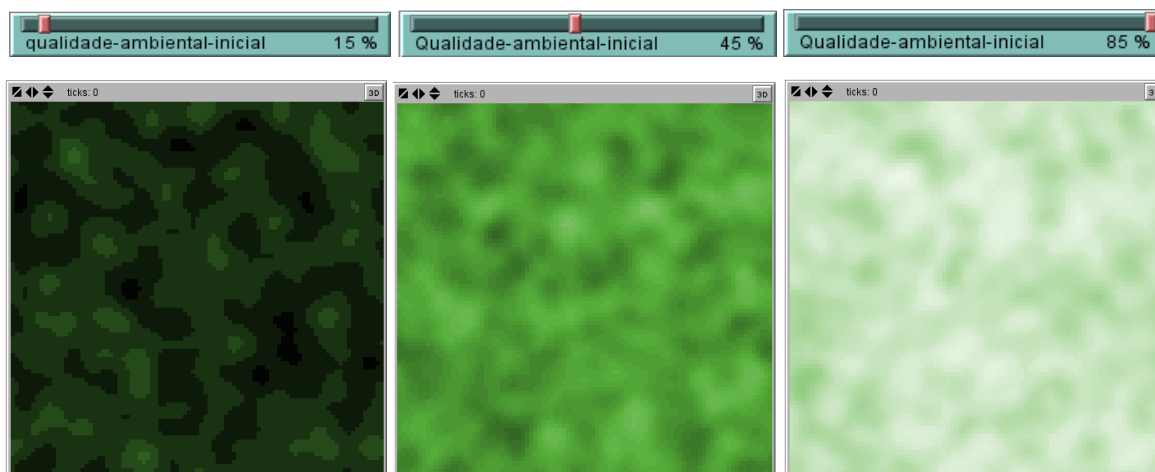


Figura 17 - Possibilidades de posicionamento do *slider* "Qualidade-ambiental-inicial".

Definido inicialmente esse valor total, o modelo distribui aleatoriamente valores de kn para cada *patch*. Essa distribuição, embora aleatória, é seguida de rotinas de difusão dos valores em relação a seus oito vizinhos, visando evitar regiões com diferenças de qualidade ambiental muito elevadas, tornando a paisagem contínua e suave.

Além da heterogeneidade da composição do ambiente, o fato que confere maior complexidade a este compartimento são as regras de comportamento para as dinâmicas de depleção e regeneração. Tais regras serão apresentadas a seguir.

5.1.3 Comportamento dos *patches*

As regras de comportamento dos *patches* podem ser divididas em (a) regras de regeneração natural do kn ; (b) regras de depleção do kn e; (c) regras de recuperação do kn pós-depleção. A seguir serão apresentadas tais regras e, ao fim, um quadro com a síntese do comportamento dos *patches* em relação ao kn .

a) Regeneração natural do kn

A cada rodada, cada um dos *patches* aumenta seu valor de kn, por meio de uma taxa de regeneração natural, válida para todo o mundo. Essa taxa, porém, pode ser alterada pelo operador, possibilitando simular vários cenários, através do *slider* "Taxa-regeneração". No modelo, essa taxa pode ser definida dentro de uma faixa que vai de zero a 1% do valor inicial do kn de cada *patch*, em cada rodada.

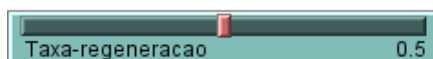


Figura 18 - *Slider* "Taxa de regeneração" do ambiente

Uma possibilidade adicional é o incremento desta taxa de regeneração do kn através de investimentos diretos dos agentes para a recuperação do capital natural. Tal condição será apresentada no tópico 5.3.

b) Depleção do kn

Quando submetidos a processos de depleção do kn pelos agentes¹⁷⁷, um conjunto de possibilidades de comportamentos pode ocorrer. Inicialmente, os *patches* podem apresentar comportamento de depleção do kn pela via linear (figura 19a) ou com limiar de ruptura, este último caracterizado quando o *patch* perde a resiliência e muda de estado de equilíbrio, tornando o estoque de kn indisponível, conforme representado esquematicamente pela figura 19b.

A quantidade de *patches* com comportamento de ruptura, dentre o total de *patches* do mundo é definida e controlada pelo operador inicialmente por meio do *slider* "Patches-comportamento-ruptura", que pode variar de zero a 100% dos *patches*, distribuídos aleatoriamente pelo mundo. Definido esse valor, assume-se que o restante dos *patches* apresentará comportamento linear.

¹⁷⁷ As regras e comportamentos dos agentes serão apresentados no tópico 5.2



Figura 19 - Slider para o controle do número de *patches* com comportamento de ruptura.

Em ambos os casos (linear ou com ruptura), existe um limite onde o *patch* perde a disponibilidade de kn , que não poderão mais ser utilizados pelos agentes do modelo. Esse limite, chamado para ambos os casos como LR (limiar de ruptura¹⁷⁸), ocorre de maneira diferente para cada uma das possibilidades de comportamentos.

Para o comportamento linear, o LR é atingido quando a demanda dos agentes não for possível de ser atendida, ou quando o *patch* atinge o valor de $kn = 0$. Já para o comportamento com ruptura, o LR é definido como um valor aleatório, podendo orbitar dentro de uma faixa de $1/3$ a $2/3$ do valor inicial de kn do *patch*¹⁷⁹. Ou seja, no processo de depleção do kn , o LR é definido individualmente para cada *patch*, e o valor de cada LR será uma função de seu valor inicial, subtraído de um valor que orbitará de $1/3$ a $2/3$ do valor inicial.

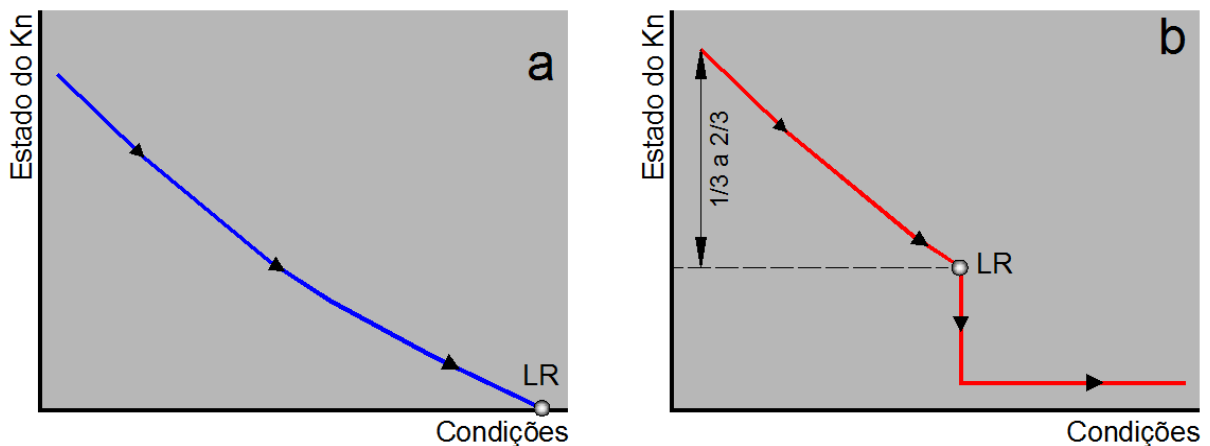


Figura 20 - Possibilidades de comportamento do kn quando submetido à processos de depleção. Em azul, o comportamento linear de depleção (a); em vermelho, o comportamento com limiar de ruptura (b).

¹⁷⁸ Para o caso de depleção linear, o LR refere-se a ruptura da disponibilidade do *patch*.

¹⁷⁹ Considerando que o modelo ora proposto não é específico, esta faixa de valor foi definida arbitrariamente, apenas para efeito de exercício de modelagem. Para aplicação em casos mais específicos, como os apresentados por Scheffer (2009), por exemplo, estes limites de variação podem ser facilmente alterados no código, conforme apresentado no anexo II deste trabalho.

c) Recuperação do kn pós-depleção

A recuperação dos valores do kn dos *patches*, através da regeneração natural, possibilita inserir um novo elemento de complexidade ao modelo, com os diferentes cenários de retomada da disponibilidade dos *patches*, definida pela superação do LR¹⁸⁰. Conforme já apresentado, o modelo inicia com uma escolha da porcentagem dos *patches* com comportamento de depleção linear ou com ruptura. Para cada um desses conjuntos de *patches*, é prevista uma segunda subdivisão. Tanto os *patches* com comportamento linear quanto os com comportamento com ruptura são subdivididos em relação à recuperação, com a possibilidade de seguir o mesmo caminho da depleção, ou com histerese no retorno.

A definição de qual o caminho de retorno o *patch* irá seguir é definida por uma regra simples. Para ambas as situações de depleção, o modelo estabelece uma porcentagem de *patches* com comportamento de recuperação com histerese. Consequentemente, os *patches* restantes apresentarão comportamento de recuperação seguindo a mesma trajetória de depleção.

O modelo prevê que essa porcentagem, para ambos os casos, seja definida aleatoriamente, em uma faixa de 5% a 15% do total de *patches* com cada tipo de comportamento de depleção¹⁸¹.

Retornando para a regra de recuperação pós-depleção, o retorno e superação do LR, foi definida uma nova variável, o LSH - Limite superior de histerese, para os casos onde o retorno obedecer a esta dinâmica. Nestes casos, o valor de LSH será definido aleatoriamente, dentro de uma faixa de 10% a 50%¹⁸² acima no valor de ruptura (LR).

A figura 20 ilustra esquematicamente as possibilidades de recuperação do kn para o caso de *patches* submetidos a regras de comportamento de depleção linear.

¹⁸⁰ Situação onde, em tese, o sistema migraria para o estado de equilíbrio original.

¹⁸¹ Da mesma forma que apresentado para a variável LR, tal faixa pode ser ajustada para simulação de casos específicos, conforme anexo II deste trabalho.

¹⁸² Idem nota 178.

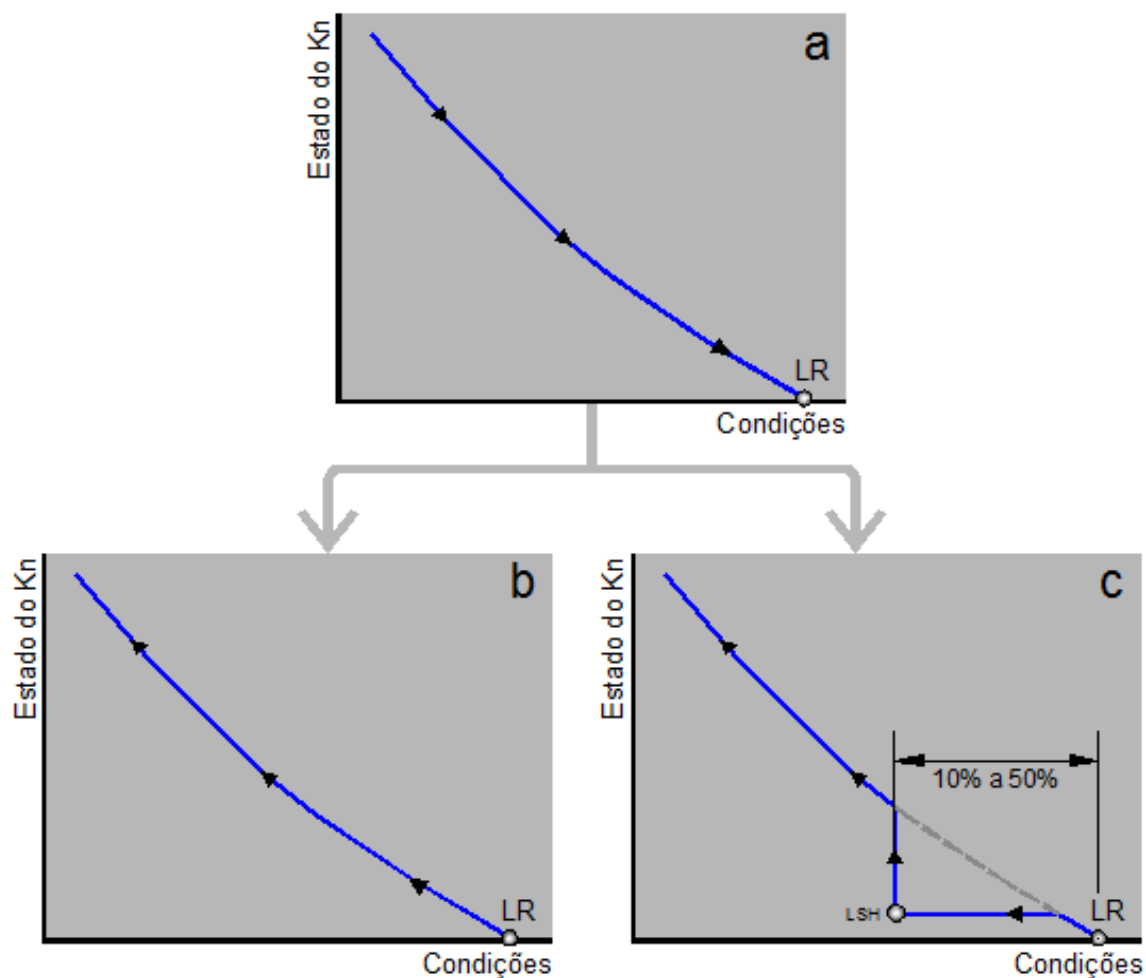


Figura 21 - Possibilidades de regeneração do Kn para depleção linear. Retorno linear(b) ou histerese (c).

Dentro da mesma lógica, para os *patches* com comportamento de depleção com limiar de ruptura, após a superação do LR, o retorno ao estado original - ou de disponibilidade do kn, segue duas possibilidades: o retorno pelo mesmo caminho (figura 21b) ou com histerese (figura 21c). Para a recuperação em cenário de histerese, a regra é a mesma apresentada para o comportamento linear, ou seja, deve superar o valor do limite superior de histerese (LSH), definido aleatoriamente dentro de uma faixa que 10% a 50% acima no valor de ruptura (LR).

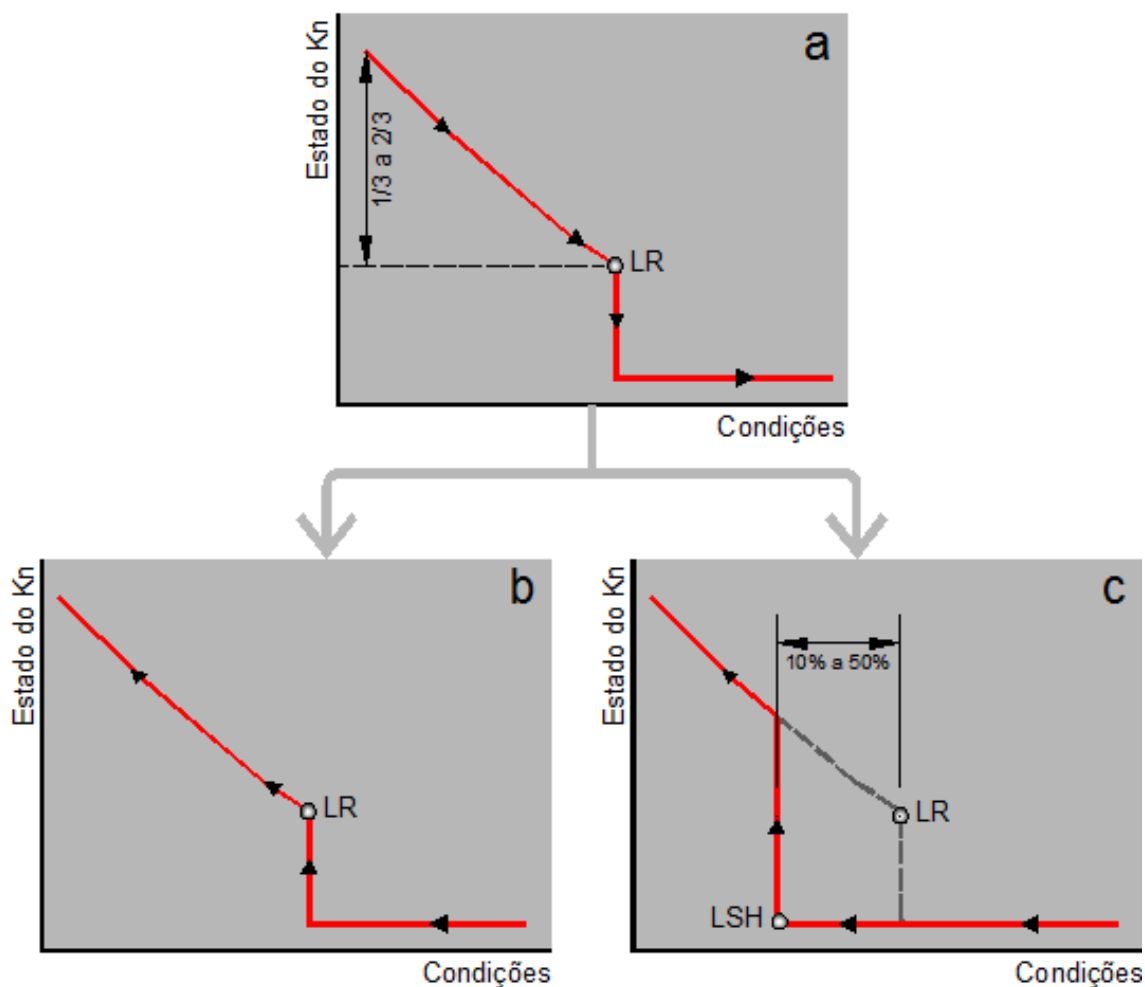


Figura 22 - Possibilidades de regeneração do Kn para *patches* com depleção a partir de comportamento de ruptura: retorno pelo mesmo caminho da ruptura(b) ou histerese (c).

Por fim, o quadro 5 sintetiza os tipos de comportamentos relacionados ao ambiente, bem como as possibilidades de composição e as regras para cada um dos casos. É importante salientar que, excetuando-se a simulação em situações extremas, ou quando o *slider* "Patches-comportamento-ruptura" estiver delimitado em zero ou 100%, todos os comportamentos ocorrerão simultaneamente durante a simulação.

Quadro 5 - Quadro síntese dos comportamentos e regras dos *patches*.

Dinâmica	Comportamentos e regras				
Regeneração Natural	<i>Regra</i>	Definida inicialmente pelo <i>slider</i> , e pode variar de zero a 1% do valor do kn do patch			
Depleção do kn	<i>Tipo</i>	Linear		Com Ruptura	
	<i>Regra</i>	% definida inicialmente pelo <i>slider</i> (1- ruptura)		% definida inicialmente pelo <i>slider</i>	
Disponibilidade do Kn	<i>Regra</i>	Até atingir o LR: ponto onde não é mais possível atender à demanda dos agentes. Ou kn=0		Até atingir o LR: valor aleatório dentro de uma faixa de 1/3 a 2/3 do valor inicial de kn do patch	
Recuperação do Kn	<i>Tipo</i>	Linear	Histerese	Mesmo caminho da ruptura	histerese
	<i>Composição</i>	(1 - histerese)	5% a 15% dos patches com comportamento	(1 - histerese)	5% a 15% dos patches com comportamento
	<i>Regra</i>	Até retornar ao valor de LR	LSH: valor aleatório dentro de uma faixa de 10% a 50% acima do valor inicial de LR	Até retornar ao valor de LR	LSH: valor aleatório dentro de uma faixa de 10% a 50% acima do valor inicial de LR

5.2 Modelagem do Sistema Econômico estilizado

Dentro do modelo ora apresentado, o sistema econômico será representado por agentes heterogêneos, chamados de *turtles* no Netlogo, que representarão empresas e, no seu conjunto, um mercado simples e estilizado. Cada agente, para realizar o objetivo da produção econômica, utilizará uma parte de seu capital monetário e uma parte do capital natural explorado para produzir e obter lucro. A dinâmica da somatória do lucro de todos os agentes do mercado representará o crescimento econômico no modelo.

Da mesma forma que ocorreu com o compartimento ambiental, a seguir serão apresentadas as premissas, regras de composição e comportamentos dos agentes.

5.2.1 Premissas do compartimento Econômico

A modelagem do compartimento econômico segue as premissas básicas elencadas a seguir:

- Os agentes, que representarão empresas inseridas em um mercado, são heterogêneos em relação ao seu capital inicial;
- Os agentes não se movem, mas possuem um raio de visão que é proporcional ao seu tamanho relativo, ou seja, não possuem informação completa;
- A produção apenas pode ser viabilizada quando existir kn disponível (dentro do raio de visão do agente). Tal premissa assume a hipótese da complementaridade dos fatores de produção, ou seja, mesmo que em valores muito baixos, a disponibilidade de capital natural é imprescindível;
- Considerando que há um limite termodinâmico para a eficiência tecnológica, os agentes já iniciarão o modelo com valores máximos de eficiência.

5.2.2 Composição e comportamento dos agentes e do mercado

Os agentes são inseridos no modelo em um número inicial pelo operador antes da simulação. Cada agente possui como variável principal sua quantidade de capital (A), que é definida aleatoriamente para cada agente, variando de 1 a 100 unidades.

A partir dessa definição, é estabelecido o raio de visão de cada agente, ou o raio onde ele pode realizar sua busca por kn para viabilizar sua produção. O tamanho do raio de visão é proporcional ao tamanho relativo de cada agente, que é definido em função de seu A em relação aos demais agentes, ou seja, o modelo identifica o agente com o maior capital e

classifica os demais de acordo com esse valor máximo. Desta forma, a definição do raio de visão de cada agente é dada por uma regra simples, conforme quadro 6¹⁸³.

Quadro 6 - Definição do raio de visão dos agentes.

Tamanho do agente	Raio de visão
A = até 1/3 do valor máximo do mercado	Até 5 <i>patches</i> de distância
A = maior de 1/3 até 2/3 do valor máximo do mercado	De 5 até 10 <i>patches</i> de distância
A = maior que 2/3 do valor máximo do mercado	De 10 até 25 <i>patches</i> de distância

O incremento do capital (A) de cada agente é dado pelo lucro da produção, considerando os custos, ou seja:

$$(1) A_t = (A_{t-1} + \pi\text{-lucro}), \text{ com o lucro é dado por:}$$

$$(2) \pi\text{-lucro} = (\text{Preço} * Q) - \text{Custos-produção}$$

O cerne de toda a atividade econômica é a produção (Q). O lucro e o valor agregado do mercado, bem como a função dos custos são definidos pela variação de Q. Desta forma, para a produção (Q) de cada agente, são necessários capital (A) e kn suficientes. O não atendimento de qualquer uma dessas condições impede a produção. Neste ponto o modelo adota a premissa da não substitutibilidade entre os fatores de produção.

A produção é dada genericamente por $Q = kn * \text{Taxa de Exploração} * \text{Eficiência Tecnológica}$. O agente busca o *patch* com maior valor dentro de seu raio de visão. A distância entre o agente e o *patch* é computada nos custos de produção. Os custos, desta forma, são considerados a partir de uma parcela fixa, dada pela porcentagem da produção, e somados com a distância do *patch* com o maior valor de kn disponível dentro do seu raio de visão.

$$(3) C = Q * 0,02 * (1 + \text{distância do patch com maior kn disponível})$$

¹⁸³ Idem nota 178.

Se o capital (A) do agente for menor ou igual a zero, o agente é eliminado do modelo e não há substituição¹⁸⁴.

A relação entre o kn disponível no *patch* e taxa de exploração define a parcela do capital natural que será efetivamente retirada do *patch*, renomeada como knu (capital natural efetivamente utilizado). Assim, $Q = knu \times \text{Eficiência Tecnológica}$.

Considerando a premissa da entropia inerente a qualquer processo de transformação, foi adotado que a eficiência tecnológica orbitará entre valores máximos e não será objeto de evolução pelo presente modelo¹⁸⁵. A definição do valor máximo da eficiência tecnológica será controlada pelo respectivo *slider*, pelo operador.

Para cada unidade de kn que o agente utiliza, é considerado o investimento necessário à exploração simples do *patch*, ou seja, para cada unidade de knu - variável que também considera a eficiência tecnológica do agente, é subtraído do agente uma unidade de A, ou proporcionalmente.

Após a produção, o agente realiza o lucro (π) e o incorpora ao seu capital (A). A somatória do lucro de todos os agentes configura o agregado da economia (X) a cada rodada.

$$(4) \pi_t = (P * Q)_t - C_t$$

$$(5) A_t = A_{t-1} + \pi$$

$$(6) X = \sum \pi_t^i$$

A cada rodada, dependendo do cenário do ambiente e do mercado, o agente opta por aumentar a sua taxa de exploração. Essa alteração, porém, apenas ocorre se três condições forem cumpridas: a) o lucro (π) da empresa for maior em t do que em t-1; b) existir kn disponível para a maior exploração dentro do raio de visão do agente e; c) o

¹⁸⁴ Idem nota 178.

¹⁸⁵ Tal simplificação foi adotada em razão do foco do modelo na evolução do capital natural, foco do trabalho como um todo.

comportamento da demanda não tiver sofrido alteração¹⁸⁶. Se todas estas condições forem atendidas, o agente aumenta sua taxa de exploração em 0,025%¹⁸⁷.

5.3 Modelagem de funções de controle externo

5.3.1 Influência da demanda com percepção ambiental

O modelo proposto prevê também o controle da dinâmica dos agentes produtivos por meio da pressão da demanda. A premissa principal é que o controle social poderia ser a ferramenta mais forte para garantir a produção em níveis compatíveis com a garantia de um ambiente minimamente saudável.

Após um determinado nível de degradação ambiental total, os preços passam a ter relação com a percepção ambiental da demanda. O modelo assume uma simplificação importante, definindo apenas duas faixas de variação dos preços: uma para condições onde não há controle da demanda, ou onde não há ruptura da demanda, e outra para condições de ruptura da demanda¹⁸⁸. Após atingir um ponto onde a percepção da degradação ambiental se torna evidente, ponto este estabelecido no modelo como LRD - Limite de Ruptura da Demanda, ocorre uma mudança drástica no consumo, refletida por meio de uma redução na quantidade de produção demandada e no preço dos produtos, atingindo valores mínimos.

Estes valores mínimos têm por objetivo manter o mercado em funcionamento e oferecer apenas os produtos mais básicos ao consumo. A quantidade mínima, no modelo, é

¹⁸⁶ O comportamento da demanda será apresentado a seguir.

¹⁸⁷ Idem nota 178.

¹⁸⁸ Embora a teoria microeconômica estabeleça claramente a definição dos preços como uma função da quantidade, o modelo ora proposto, em razão do foco no comportamento do capital natural, adotou apenas essa variável como significativa. Tal questão será retomada no anexo II, com a indicação das possibilidades de alteração e extensão da função preço.

definida como a quantidade total produzida na primeira rodada por todos os agentes do mercado, e o preço mínimo é definido como 10% acima do valor investido para a produção¹⁸⁹.

Ainda, sempre que ocorrer a ruptura na demanda, os agentes alterarão sua taxa de exploração. A cada rodada que o modelo rode com a demanda rompida, os agentes recuarão sua taxa de exploração em 0,975¹⁹⁰.

O valor do LDR é uma função do valor da qualidade ambiental inicial total (ou valor inicial do capital natural total), e é definido pelo operador através do *slider* "Limite-Ruptura-Demanda".



Figura 23 - Slider "Limite-Ruptura-Demanda"

Após a ruptura, foi adotado que existirá histerese no retorno da demanda, ou seja, para que os agentes recuperem seus comportamentos originais, o ambiente deverá atingir um nível de qualidade ambiental maior do que o nível de ruptura. Este valor de recuperação, chamado no modelo de LSH-D, ou Limite Superior de Histerese da Demanda, é definido aleatoriamente dentro de uma faixa que varia de 10% a 30% do valor de LRD. Neste sentido, para que ocorra a normalização da demanda (em relação a quantidades demandadas e preço) a somatória dos kn de todos os *patches* deverá ser de 10% a 30% maior do que o valor de ruptura, no caso, o valor de LRD.

O modelo, porém, considera que uma pequena porcentagem dos agentes não irão ser influenciados pela pressão da demanda e seguirão suas rotinas de produção, sem levar em consideração a qualidade ambiental. Esta porcentagem é definida aleatoriamente, e varia de 5% a 15% do total de agentes do mercado.

¹⁸⁹ O preço, neste caso, será de 1,1 multiplicado pelo volume da produção. Idem nota 178.

¹⁹⁰ Idem nota 178.

5.3.3 Taxação dos agentes produtores e investimentos no kn

Uma rotina complementar foi inserida no modelo para simular alterações no capital natural e no crescimento quando existe uma taxação imposta pela exploração do capital natural. Sempre que solicitado pelo *slider* "taxação?", os custos da produção do agente serão incrementados por uma taxa, definida pela variável "Tx-Eco", e haverá um incremento na taxa de regeneração do ambiente, também proporcional à taxa estabelecida.

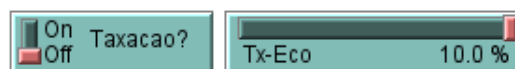


Figura 24 - Controles para a taxação da produção e investimento no capital natural.

5.4 Simulações e resultados

O modelo adota como saídas, gráficos do comportamento agregado do capital natural e do crescimento econômico do mercado. Além dos gráficos, existe a interface gráfica do comportamento do ambiente, conforme figura 16.

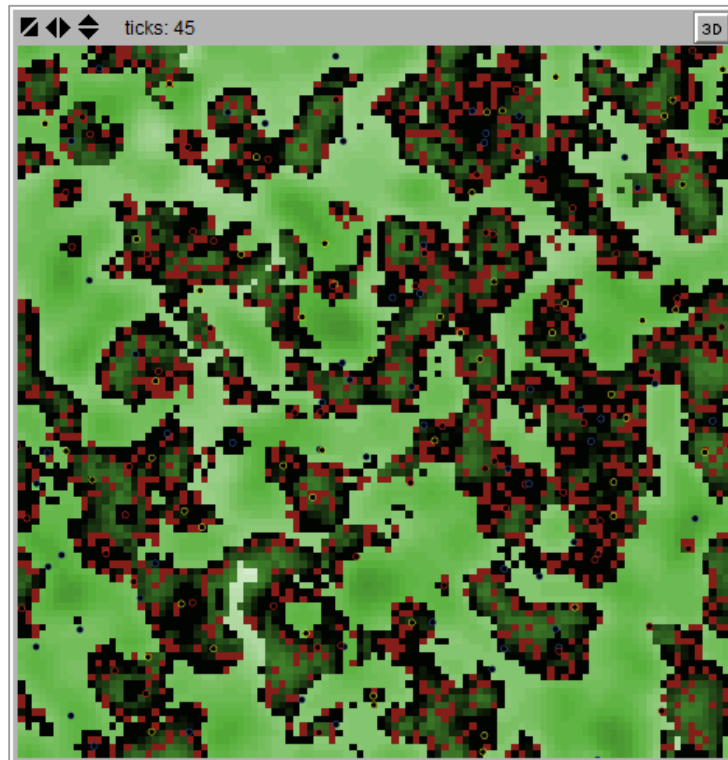


Figura 25 - Interface gráfica do ambiente.

Variações da escala de verde significam os estoques de kn de cada *patch*, com tons mais claros associados à maior qualidade ambiental. *Patches* em preto representam kn igual a zero, tipicamente para *patches* com comportamento linear. *Patches* em vermelho representam kn indisponível (após a ruptura).

A seguir serão apresentados alguns resultados¹⁹¹ de simulações, realizadas em diferentes condições iniciais. As simulações ora apresentadas foram classificadas em relação à qualidade ambiental inicial do modelo (QA), da composição dos *patches* em relação ao seu comportamento de depleção, do controle da demanda, e da taxação e investimento no capital natural. O quadro 7 sintetiza as condições iniciais simuladas.

As porcentagens dos comportamentos de recuperação dos *patches* (pelo mesmo caminho da depleção ou com histerese) foram definidas aleatoriamente pelo modelo, respeitando a faixa de variação definida inicialmente¹⁹².

Os parâmetros de ajuste dos agentes foram mantidos inalterados, em um número inicial de 200, taxa de exploração inicial de 65% e eficiência tecnológica de 95%. A exceção ocorreu na simulação 10, onde foram propostos parâmetros iniciais que garantissem a maior heterogeneidade possível (qualidade ambiental inicial média, 50% de *patches* com

¹⁹¹ Os cenários foram escolhidos visando a realização de comparações entre as simulações e a verificação do comportamento do modelo quando submetidos à alteração de poucas variáveis.

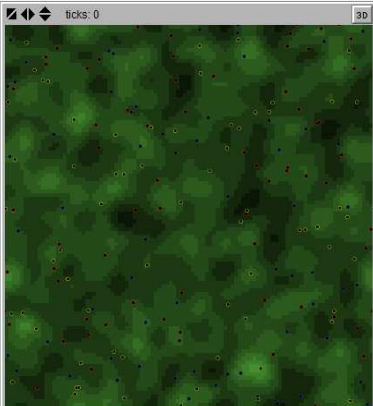
¹⁹² Ver quadro 5.


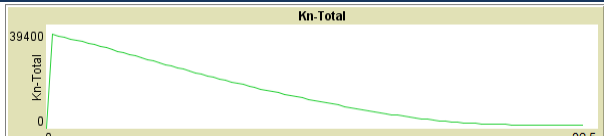

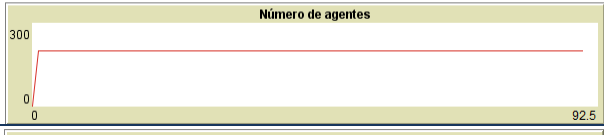
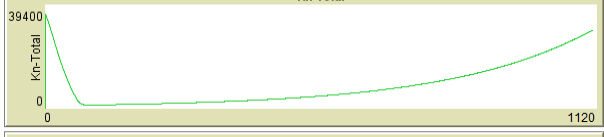
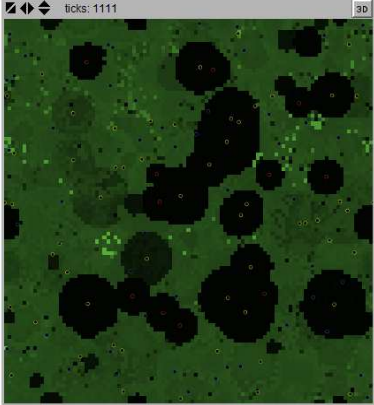
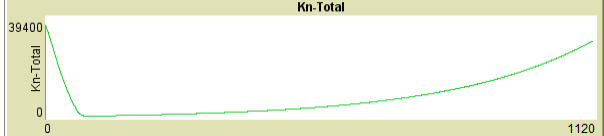
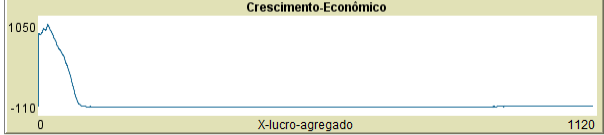

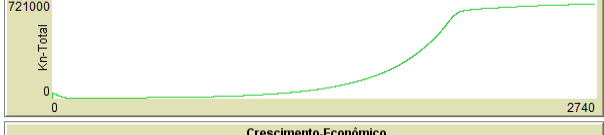
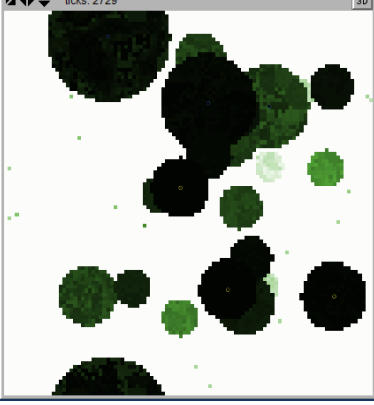
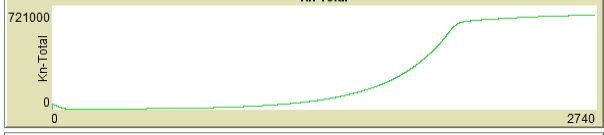
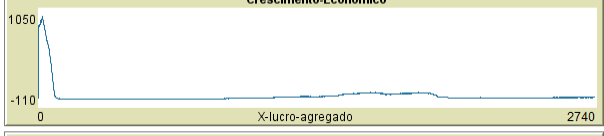
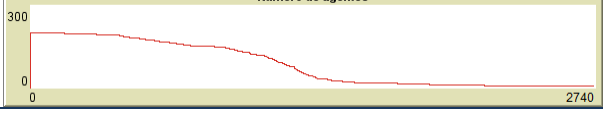

comportamento de ruptura, Limite de RD em 50%, taxa de investimento no capital natural de 10% e eficiência tecnológica dos agentes em 99%.

Quadro 7 - Condições iniciais das simulações realizadas.

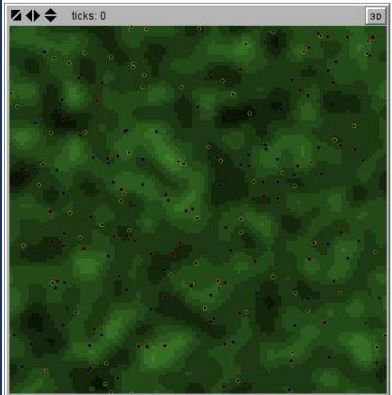
Simulações	Classificação QA inicial	% QA inicial (total)	Comportamento dos <i>patches</i>	Demanda	Limite RD	Taxação	Taxa invest. Kn
1	Baixa	20%	100% <i>patches</i> com comport. Linear	não	---	não	---
2			65% linear / 35% ruptura	sim	50%	não	---
3			65% linear / 35% ruptura	sim	70%	sim	10%
4	Média	55%	100% <i>patches</i> com comport. Linear	não	---	não	---
5			65% linear / 35% ruptura	sim	50%	não	---
6			65% linear / 35% ruptura	sim	70%	sim	10%
7	Alta	80%	100% <i>patches</i> com comport. Linear	não	---	não	---
8			65% linear / 35% ruptura	sim	50%	não	---
9			65% linear / 35% ruptura	sim	70%	sim	10%
10	Média	55%	50% linear / 50% ruptura	sim	50%	sim	10%

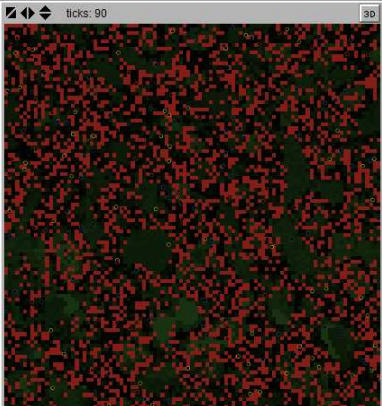
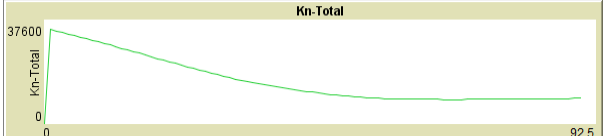
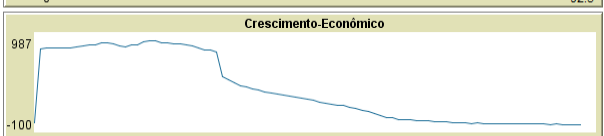
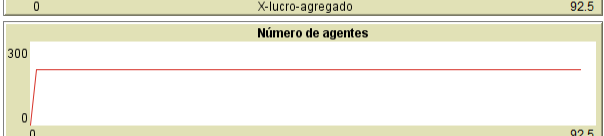
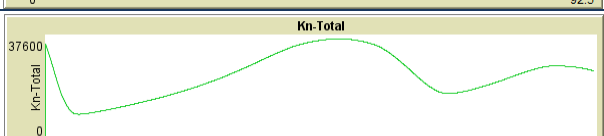
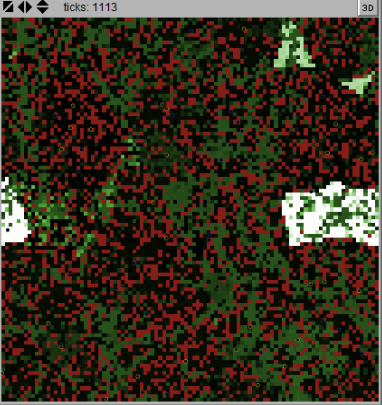
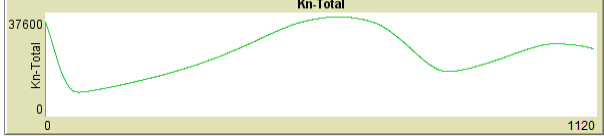
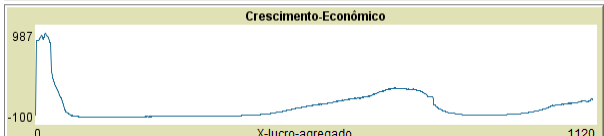

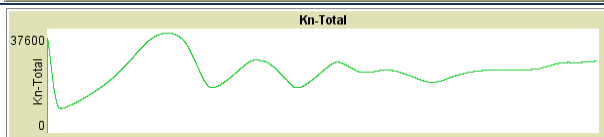
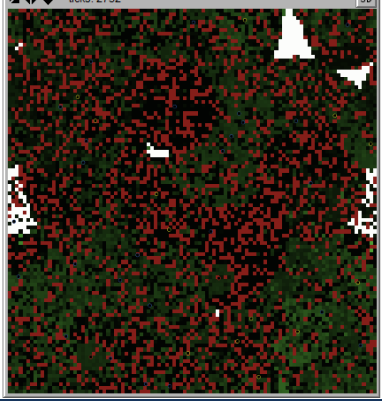
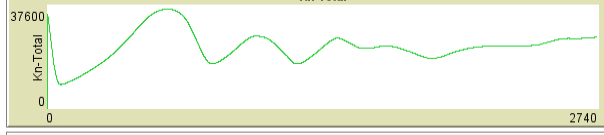

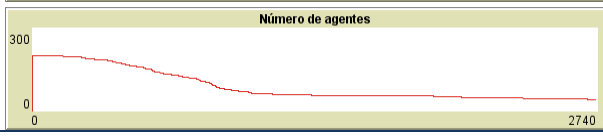

Simulação 1

Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial	20%	
		Taxa regeneração	0,35%	
		Comport. Linear	% do total de <i>patches</i>	
		% com histerese	35,91%	
		Comport. Ruptura	% do total de <i>patches</i>	
		% dos <i>patches</i> com ruptura	não	
	Agentes	Número inicial de agentes	200	
		Taxa de exploração inicial	65%	
		Eficiência tecnológica	95%	
	Demanda	Controle da Demanda?	não	
		Limite de Ruptura da Demanda	não	
Invest. Kn	Taxação		não	
	Taxa investimento Kn		não	

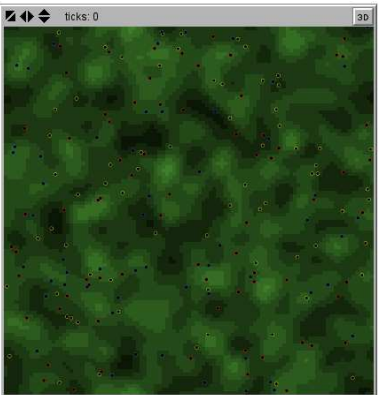
t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)		   	200
Médio Prazo (tick = 1111)		   	118
Longo Prazo (tick = 2729)		   	06

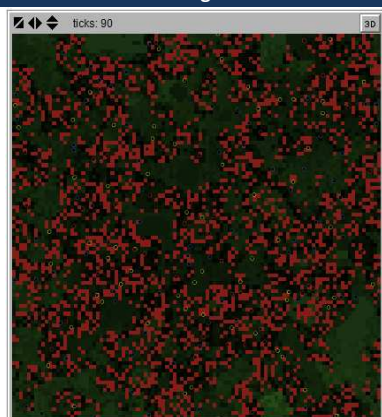
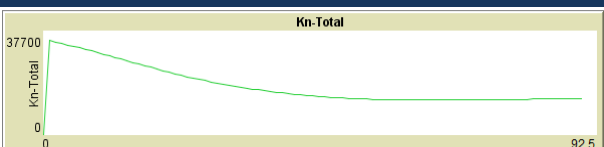
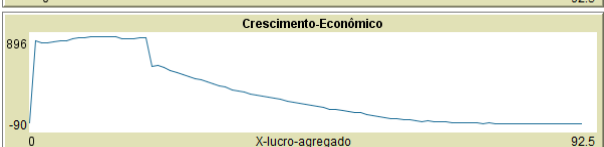
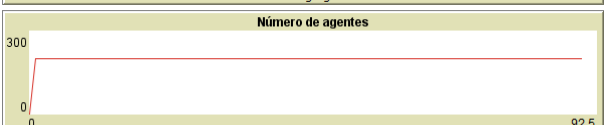
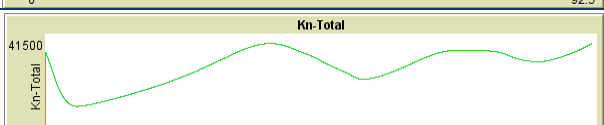
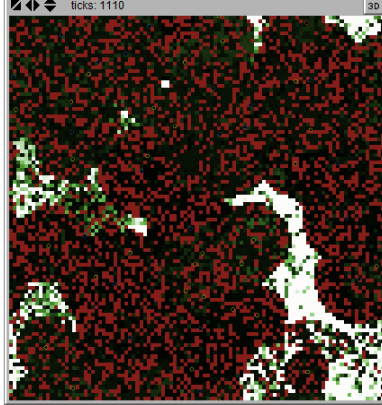
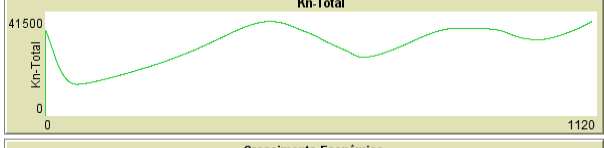
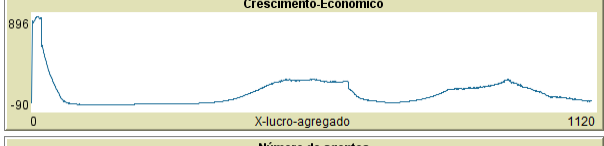

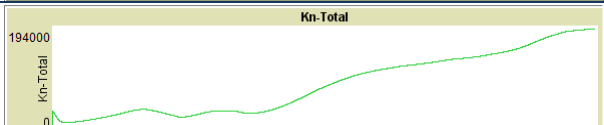
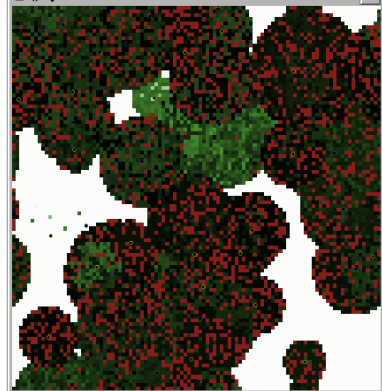


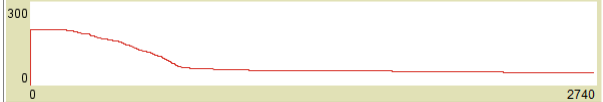

Simulação 2

Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial	20%	
		Taxa regeneração	0,35%	
		Comport.	% do total de <i>patches</i>	
		Linear	% com histerese	
		Comport.	% do total de <i>patches</i>	
		Ruptura	% dos <i>patches</i> com ruptura	
	Agentes	Número inicial de agentes	200	
		Taxa de exploração inicial	65%	
		Eficiência tecnológica	95%	
	Demanda	Controle da Demanda?	sim	
		Limite de Ruptura da Demanda	50%	
Invest. Kn	Taxação		não	
	Taxa investimento Kn		não	

t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)		   	200
Médio Prazo (tick = 1113)		   	63
Longo Prazo (tick = 2732)		   	41

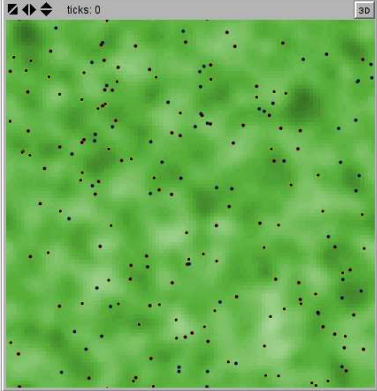
Simulação 3

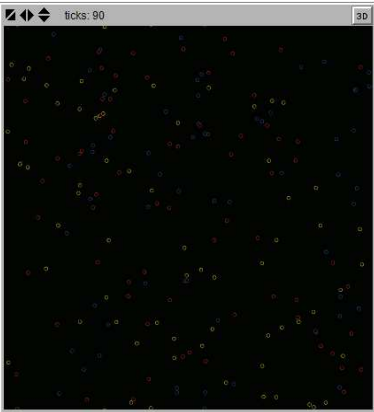
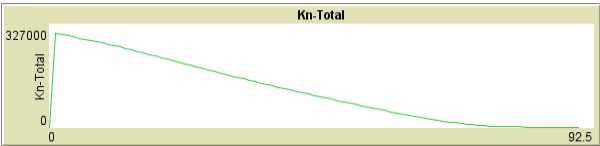
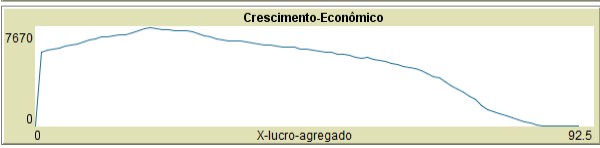
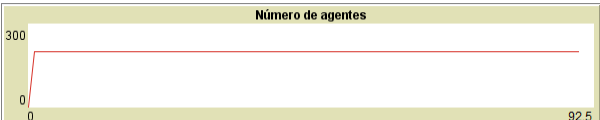
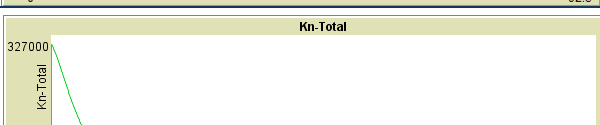
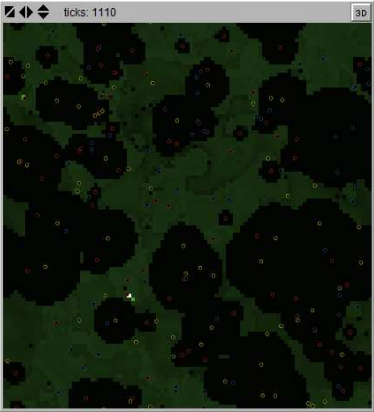
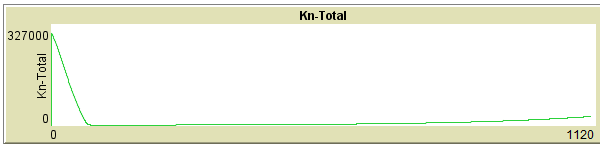
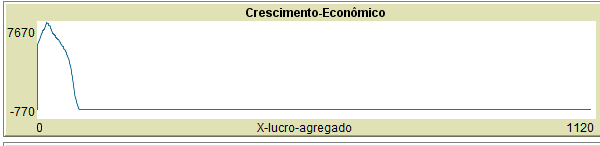
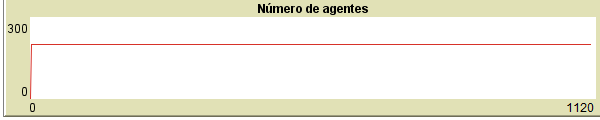
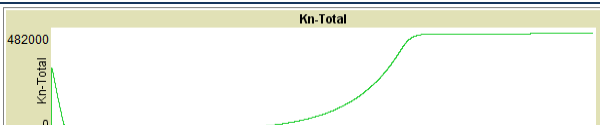
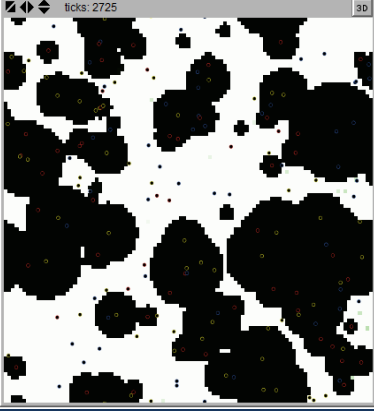
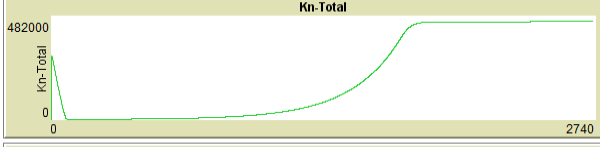
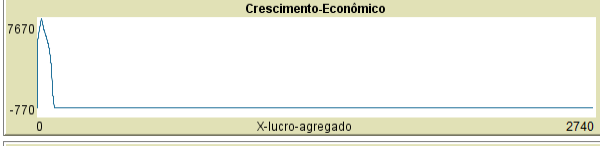
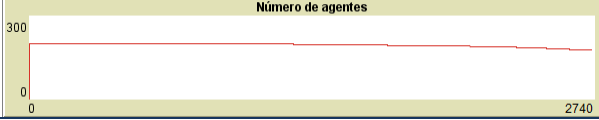

Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial		20%	
		Taxa regeneração		0,35%	
		Comport.	% do total de <i>patches</i>	65%	
		Linear	% com histerese	21,09%	
		Comport.	% do total de <i>patches</i>	35%	
		Ruptura	% dos <i>patches</i> com ruptura	16,83%	
	Agentes	Número inicial de agentes		200	
		Taxa de exploração inicial		65%	
		Eficiência tecnológica		95%	
	Demanda	Controle da Demanda?		sim	
		Limite de Ruptura da Demanda		70%	
	Invest. Kn	Taxação		sim	
		Taxa investimento Kn		10%	

t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)		   	200
Médio Prazo (tick = 1110)		   	53
Longo Prazo (tick = 2727)		   	43

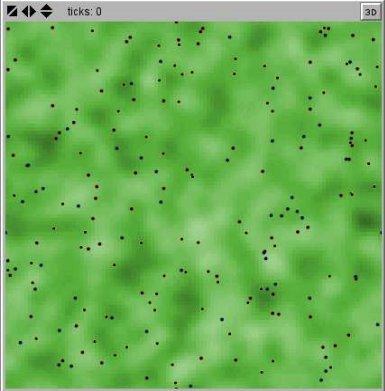
Simulação 4

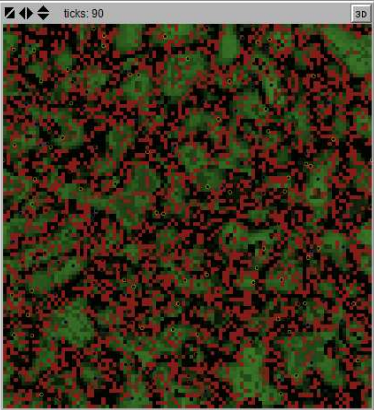
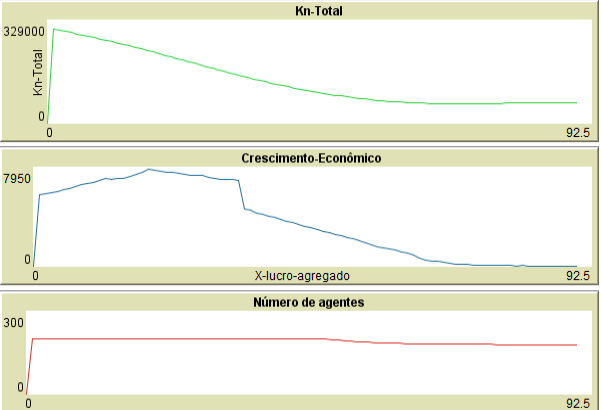
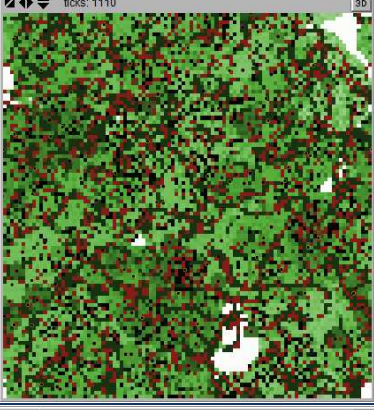
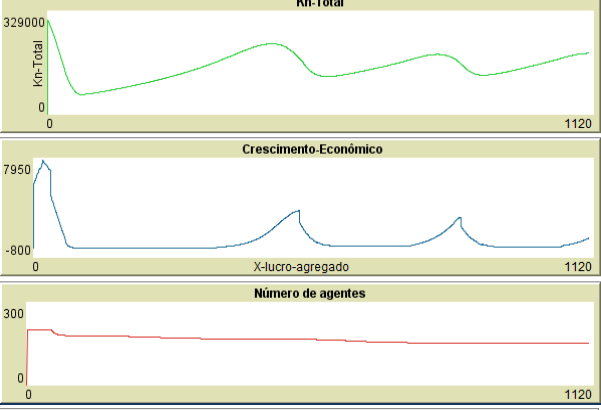
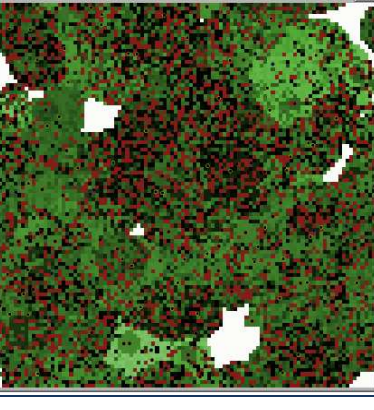
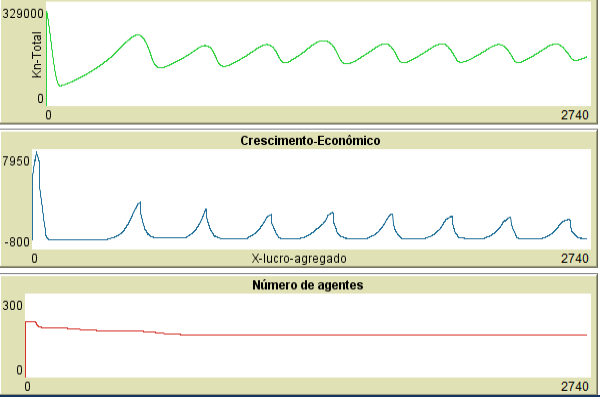
Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial	55%
		Taxa regeneração	0,40%
		Comport. Linear	% do total de <i>patches</i> 100%
		% com histerese	17,48%
		Comport. Ruptura	% dos <i>patches</i> com ruptura não
	Agentes	Número inicial de agentes	200
		Taxa de exploração inicial	65%
		Eficiência tecnológica	95%
	Demanda	Controle da Demanda?	não
		Limite de Ruptura da Demanda	não
Invest. Kn	Taxação		não
	Taxa investimento Kn		não



t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)		   	200
Médio Prazo (tick = 1110)		   	200
Longo Prazo (tick = 2725)		   	177

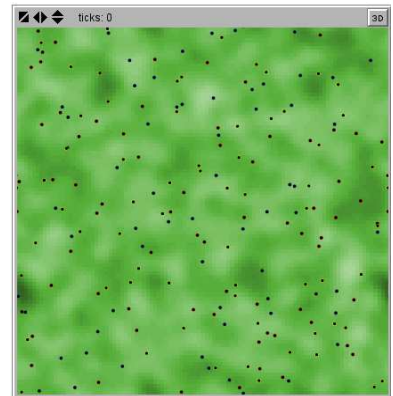
Simulação 5

Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial		55%	
		Taxa regeneração		0,40%	
		Comport.	% do total de patches	65%	
		Linear	% com histerese	15,20%	
		Comport.	% do total de patches	35%	
		Ruptura	% dos patches com ruptura	21,5%	
	Agentes	Número inicial de agentes		200	
		Taxa de exploração inicial		65%	
		Eficiência tecnológica		95%	
	Demanda	Controle da Demanda?		sim	
		Limite de Ruptura da Demanda		50%	
	Invest. Kn	Taxação		não	
		Taxa investimento Kn		não	

t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)			179
Médio Prazo (tick = 1110)			151
Longo Prazo (tick = 2720)			150

Simulação 6

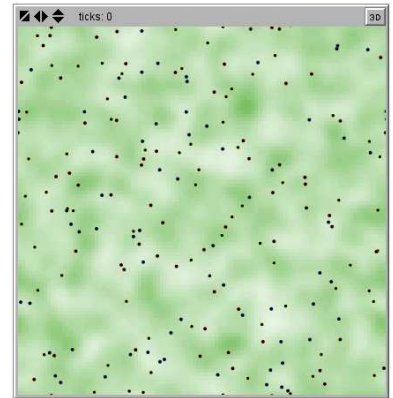
Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial		55%
		Taxa regeneração		0,40%
		Comport.	% do total de <i>patches</i>	70%
		Linear	% com histerese	24,5%
		Comport.	% do total de <i>patches</i>	35%
		Ruptura	% dos <i>patches</i> com ruptura	25,31%
	Agentes	Número inicial de agentes		200
		Taxa de exploração inicial		65%
		Eficiência tecnológica		95%
	Demanda	Controle da Demanda?		sim
		Limite de Ruptura da Demanda		70%
	Invest. Kn	Taxação		sim
		Taxa investimento Kn		10%



t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)		<p>Kn-Total</p> <p>Crescimento-Econômico</p> <p>X-lucro-agregado</p> <p>Número de agentes</p>	78
Médio Prazo (tick = 1111)		<p>Kn-Total</p> <p>Crescimento-Econômico</p> <p>X-lucro-agregado</p> <p>Número de agentes</p>	71
Longo Prazo (tick = 2731)		<p>Kn-Total</p> <p>Crescimento-Econômico</p> <p>X-lucro-agregado</p> <p>Número de agentes</p>	71

Simulação 7

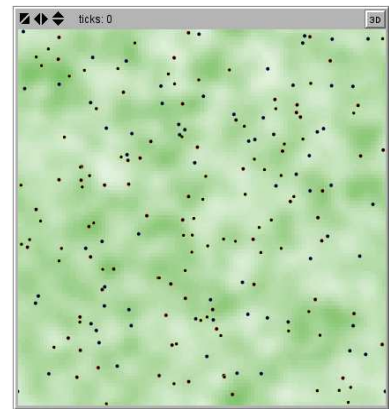
Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial	80%
		Taxa regeneração	0,40%
		Comport. Linear	% do total de <i>patches</i> 100%
		% com histerese	26,6%
		Comport. Ruptura	% dos <i>patches</i> com ruptura não
	Agentes	Número inicial de agentes	200
		Taxa de exploração inicial	65%
		Eficiência tecnológica	95%
	Demanda	Controle da Demanda?	não
		Limite de Ruptura da Demanda	não
Invest. Kn	Taxação		não
	Taxa investimento Kn		não



t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)			200
Médio Prazo (tick = 1110)			200
Longo Prazo (tick = 2725)			199

Simulação 8

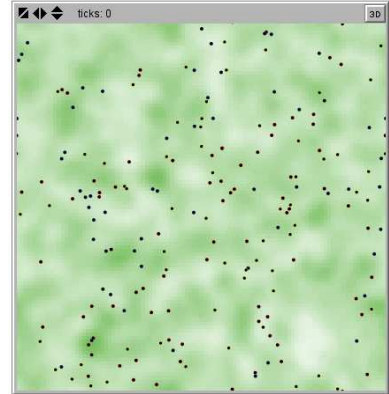
Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial	80%
		Taxa regeneração	0,40%
		Comport.	% do total de <i>patches</i>
		Linear	65%
		Comport.	% do total de <i>patches</i>
		Ruptura	30,92%
	Agentes	Número inicial de agentes	200
		Taxa de exploração inicial	65%
		Eficiência tecnológica	95%
	Demanda	Controle da Demanda?	sim
		Limite de Ruptura da Demanda	50%
Invest. Kn	Taxação		não
	Taxa investimento Kn		não



t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 91)			170
Médio Prazo (tick = 1113)			160
Longo Prazo (tick = 2728)			160

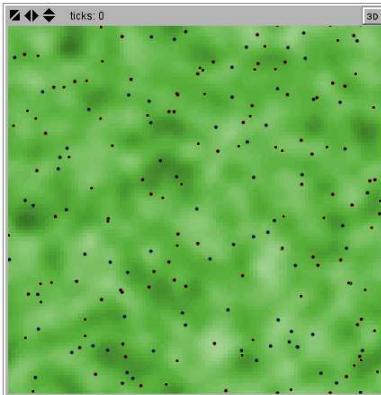
Simulação 9

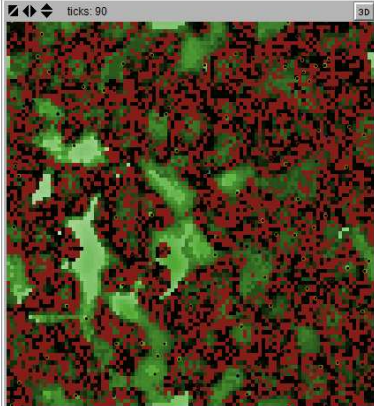
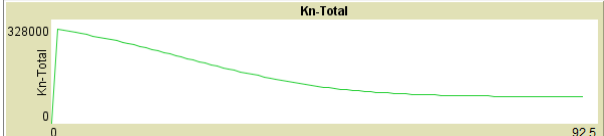

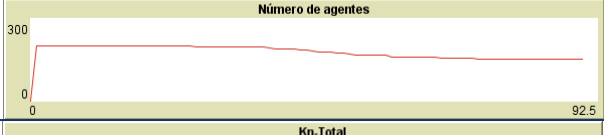


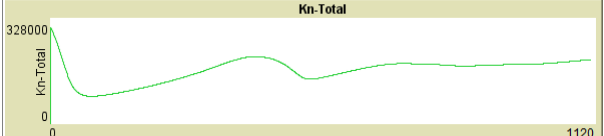

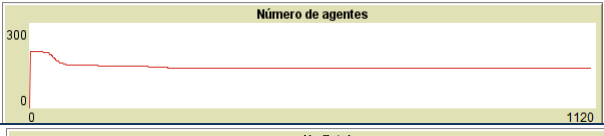
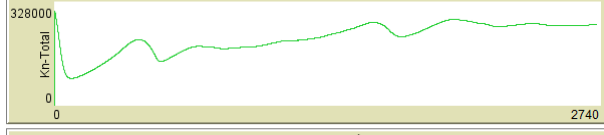
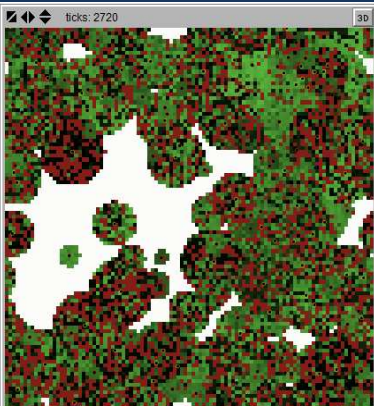
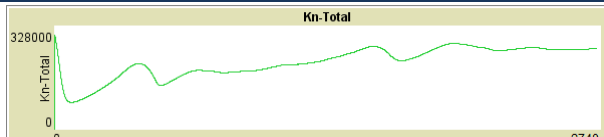

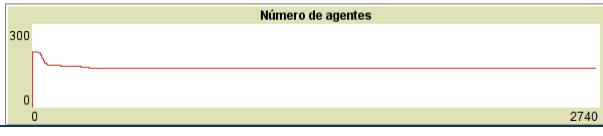

Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial	80%
		Taxa regeneração	0,40%
		Comport. Linear	% do total de <i>patches</i> 65%
		Comport. Linear	% com histerese 26,7%
		Comport. Ruptura	% do total de <i>patches</i> 35%
		Comport. Ruptura	% dos <i>patches</i> com ruptura 22,61%
	Agentes	Número inicial de agentes	200
		Taxa de exploração inicial	65%
		Eficiência tecnológica	95%
	Demanda	Controle da Demanda?	sim
		Limite de Ruptura da Demanda	70%
	Invest. Kn	Taxação	sim
		Taxa investimento Kn	10%



t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)			79
Médio Prazo (tick = 1110)			73
Longo Prazo (tick = 2722)			72

Simulação 10

Parâmetros iniciais	Ambiente	Qualidade ambiental inicial	50%	
		Taxa regeneração	0,35%	
		Comport. Linear	% do total de <i>patches</i>	
			% com histerese	
			26,7%	
		Comport. Ruptura	% dos <i>patches</i> com ruptura	
			22,61%	
	Agentes	Número inicial de agentes	200	
		Taxa de exploração inicial	65%	
		Eficiência tecnológica	99%	
	Demanda	Controle da Demanda?	sim	
		Limite de Ruptura da Demanda	50%	
	Invest. Kn	Taxação	sim	
		Taxa investimento Kn	10%	

t	Interface gráfica	Gráficos de Saída	Agentes
Curto Prazo (tick = 90)		   	151
Médio Prazo (tick = 1110)		   	141
Longo Prazo (tick = 2722)		   	139

Inicialmente, é interessante notar que, mesmo com toda a heterogeneidade desenhada para a evolução dos *patches* do modelo, independente do cenário inicial, sua evolução é marcada por dinâmicas muito suaves, sem mudanças bruscas ou grandes rupturas. Mesmo com parte dos *patches* com comportamento de ruptura e histerese no retorno, o efeito do conjunto atenua as variações mais severas de algumas regiões.

Outro ponto importante a considerar são os cruzamentos das saídas dos gráficos e da interface gráfica do modelo, em relação ao capital natural. Embora, em algumas situações, os gráficos indiquem que o ambiente sofreu uma recuperação acentuada, tendendo à estabilidade, a análise dos *patches* na interface gráfica do modelo revela cenários com paisagens marcadas por descontinuidades absolutas, inclusive com a formação de "ilhas" de baixa qualidade ambiental.

E de fato, este tipo de cenário de longo prazo faz sentido. A evolução dos agentes produtivos, baseados principalmente no acesso e disponibilização a recursos naturais, quando os mesmos são mais escassos, atua no sentido de selecionar os agentes com melhores condições iniciais. Estes agentes mais "fortes" conseguem se manter no mercado por um período maior, com tempo suficiente para adaptar sua taxa de exploração às condições ambientais e manter o capital natural, dentro do seu raio de visão, em níveis mínimos para sua contínua regeneração.

Outra consideração que pode ser realizada em relação à formação de "ilhas" de degradação ambiental é a premissa da informação imperfeita dos agentes. Mesmo que a qualidade ambiental total esteja em níveis superiores, os agentes consideram apenas a situação dentro do seu raio de visão, e adaptam sua estratégia apenas à sua realidade.

Entrando especificamente na análise das simulações realizadas, os cenários 1, 4 e 7 partem de uma configuração de parâmetros iniciais exatamente igual, variando apenas a qualidade ambiental inicial. De uma maneira geral, os gráficos do comportamento do capital natural e do crescimento econômico agregado são muito semelhantes nas três simulações indicando que, em situações onde não existe nenhuma forma de controle externo¹⁹³, a

¹⁹³ No modelo, o controle externo é representado pela demanda e pela taxação da produção.

variável qualidade ambiental inicial tem pouca relevância do ponto de vista do crescimento econômico ou do comportamento do capital natural¹⁹⁴.

A grande diferença, nos cenários das simulações 1, 4 e 7, ocorre na viabilidade e manutenção do número de agentes do modelo. Quanto maior a qualidade ambiental inicial, maior a estabilidade na dinâmica dos agentes. Isto ocorre porque, em condições iniciais de qualidade ambiental mais favoráveis, os agentes incrementam muito seu capital nas primeiras etapas, adquirindo suporte para o longo período com estoques muito baixos de capital natural¹⁹⁵. A variação do comportamento do capital natural no médio prazo, nos três cenários, está relacionada ao número de agentes produtivos em ação no modelo.

Outra questão interessante é que, nos cenários considerados, onde não há nenhuma forma de controle externo, seja por parte da demanda ou de uma regra de taxaço, a depleção do estoque total de capital natural sempre atinge níveis mínimos, próximos ao colapso do sistema. Tal comportamento aproxima os resultados do modelo à armadilha social desenhada por Hardin (1968) na sua *Tragedy of the Commons*.

Já em cenários com maior heterogeneidade em relação ao ambiente, com a inserção de *patches* com comportamento de ruptura, e com o controle da demanda, como nas simulações 2, 5 e 8, fica evidente a existência de um ponto de inflexão e mudança de comportamento (gráficos de curto prazo). Após essa ruptura inicial, o mercado persegue uma condição de maior estabilidade, representada pelo limite da ruptura da demanda, aqui estabelecida em 50% da qualidade ambiental inicial, e pela variação na taxa de exploração dos agentes. Tal dinâmica cria ciclos - mais estáveis em condições iniciais médias e altas - em razão da persistência de um número maior de agentes em operação no modelo.

Nos cenários de maior proteção ambiental - simulações 3, 6 e 9, com a elevação no limite da ruptura de demanda para 70% e o incremento da taxaço para investimento no capital natural, mudanças significativas podem ser visualizadas. Como o limite da RD aumentou, o ponto de inflexão ocorre mais cedo, garantindo uma melhor condição

¹⁹⁴ Desde que o ambiente se comporte integralmente de maneira linear e com uma taxa de regeneração constante, como nos casos simulados.

¹⁹⁵ Os estoques dos *patches* dificilmente atingem seu total esgotamento em razão da regeneração natural contínua.

ambiental de curto prazo. O aporte dos investimentos na recuperação do capital natural, neste sentido, é intensificado, com resultados mais expressivos. Em todos os casos, o crescimento econômico de longo prazo tende a uma condição estacionária, com valores muito baixos e próximos a zero, com baixíssimas flutuações. Ainda na esfera econômica, o mercado adquire maior estabilidade a partir do médio prazo, quando as variações na composição e no número de empresas são muito pequenas.

Em tais cenários, o modelo atinge a sustentabilidade¹⁹⁶, com o capital natural total em condições iguais ou superiores ao estado original, um sistema econômico operando no mínimo para o atendimento da demanda, e estabilização no longo prazo. Tais respostas reforçam as teorias propostas por Herman Daly desde 1977¹⁹⁷, mesmo com um modelo estilizado e com regras muito simples. Entretanto, ainda é importante verificar as diferenças nas paisagens do ambiente. Em condições iniciais muito baixas, as rupturas ainda são bruscas, mesmo com o agregado do capital natural do modelo em níveis muito acima da condição inicial.

Por fim, no cenário definido para a simulação 10, onde a intenção era entender os comportamentos dos sistemas econômico e ambiental em condições de maior complexidade possível, a dinâmica do capital natural total apresenta-se com algumas peculiaridades. O suporte do limite de RD, definido em 50%, apenas é respeitado até o médio prazo. Ao longo das rodadas, o capital natural tende a buscar a estabilização próximo aos valores iniciais, sem alcançar valores superiores, como ocorreu na maior parte das simulações anteriores. O mercado ainda busca a condição estacionária, porém com um número de agentes produtivos maior do que os apresentados nas simulações anteriores onde a condição estacionária pôde ser constatada.

Como síntese das simulações realizadas, é possível afirmar que há, no longo prazo, uma tendência à diminuição do crescimento econômico e do número de empresas no mercado. Dependendo das condições iniciais e de regeneração, o comportamento do capital natural varia entre cenários extremos, desde o colapso até a sua recuperação. Ainda, dadas as premissas e regras estabelecidas pelo modelo, o controle da demanda e a taxação para

¹⁹⁶ Sustentabilidade aqui entendida sob o prisma da sustentabilidade forte, conforme capítulo 4.

¹⁹⁷ Data da primeira edição de *Steady-State Economy*.

investimentos no capital natural são as variáveis que possuem condições de alterar mais significativamente as dinâmicas dos agentes e, conseqüentemente, os impactos sobre o ambiente. Tal questão induz à reflexão sobre a importância da conscientização do poder dos consumidores sobre as estratégias do setor produtivo, bem como da questão do papel da educação ambiental no contexto da sustentabilidade.

De uma maneira, geral, é possível afirmar que o exercício de modelagem proposto, embora estilizado e com simplificações e limitações importantes, principalmente em relação ao compartimento econômico¹⁹⁸, possibilitou o atendimento aos objetivos do trabalho e a corroboração da hipótese inicial, reforçando a importância de uma avaliação dinâmica, onde a variável tempo é fundamental, e baseada em premissas simples, porém realistas.

Para concluir, ainda em relação ao modelo proposto, foi realizada a opção pela disponibilização plena de todos os códigos¹⁹⁹, visando à continuidade, correções e viabilização de novos exercícios a partir da base construída.

Conforme já mencionado, o modelo assume algumas limitações que poderiam ser melhores estudadas e implementadas em análises futuras, como os pontos apresentados no anexo II desta dissertação. Outras extensões do modelo, ou possibilidades interessantes de novos exercícios, porém, poderiam ser inseridos, como a questão do progresso tecnológico nos moldes propostos por Nelson e Winter (2005), além da premissa proposta por Stiglitz (1997), que afirma que poderia ocorrer substituição entre os fatores de produção no curto prazo, limitando a complementaridade aos horizontes de médio e longo prazos. Ainda, a evolução do controle da demanda, que poderia ser guiada por regras evolucionárias próprias pautadas por uma maior conscientização no médio e longo prazos, poderia ampliar as possibilidades de análises.

¹⁹⁸ As simplificações, limitações e possíveis extensões e alterações no modelo serão apresentadas no anexo II deste trabalho.

¹⁹⁹ Anexo I.

O presente trabalho se propôs a realizar uma reflexão sobre capital natural, crescimento econômico e riqueza, dentro da perspectiva da sustentabilidade, sob a ótica dos sistemas complexos. Esta ampliação do universo de análise sobre um tema tão maleável e por vezes controverso, obviamente, implica em contrapor abordagens mais tradicionais ou baseadas em diferentes premissas, estabelecer novos marcos conceituais, e vislumbrar novos horizontes potenciais.

Desta forma, um primeiro e breve, porém necessário, comentário é a relação potencialmente conflituosa entre a abordagem ora proposta e o viés dos métodos valorativos do capital natural, conforme tratado no capítulo 3, ainda muito presentes dentro das avaliações entre os sistemas econômico e ambiental, mesmo dentro da economia ecológica.

Há uma aparente incompatibilidade entre este tipo de avaliação e a abordagem baseada nos sistemas complexos, visto que os métodos atuais de valoração implicam necessariamente no estabelecimento de relações pontuais, indiretas e estáticas entre insumos ambientais sem valor de mercado e oscilações nos valores de bens ou serviços de mercado (PEARCE; MORAN, 1994).

A abordagem defendida pelo presente trabalho, que pretende inserir a complexidade dentro dos debates sobre a sustentabilidade, contrapõe o viés adotado pelas metodologias de valoração mais usuais, principalmente em relação à questão da importância do tempo na evolução das variáveis e das relações de interdependência entre os elementos que compõe o sistema ecológico-econômico.

Desta forma, se o desenvolvimento teórico e metodológico da Economia Ecológica vier a considerar plenamente a complexidade, principalmente por meio de sua dimensão metodológica, como sugere toda a argumentação apresentada até o momento, haverá a

necessidade de discutir o suporte das ferramentas oriundas da Economia Ambiental, principalmente em relação aos métodos valorativos.

No sentido contrário, a simples ampliação do conceito de capital natural permite uma clara redefinição de rumos, viabilizando uma saudável aproximação entre campos de pesquisa tão inovadores e distintos. De fato, é possível afirmar que existem muitas áreas de contato entre a economia ecológica e as teorias dos sistemas complexos e evolucionária, com potencial para o desenvolvimento mútuo entre as áreas de pesquisa.

A leitura do fenômeno socioeconômico-ambiental por meio destas interfaces tem a potencialidade de ampliar o horizonte das análises, bem como reenquadrar e reavaliar questões importantes do ponto de vista da sustentabilidade. Neste sentido, uma possibilidade teórica interessante seria a compatibilização metodológica entre a economia ecológica e a economia da complexidade, principalmente considerando as críticas e rupturas em relação às teorias tradicionais propostas por ambas.

O desenvolvimento desta nova abordagem depende, entretanto, do reconhecimento da importância e da centralidade da variável *tempo* nas avaliações econômicas e sobre a sustentabilidade como um todo. A verificação do comportamento dos sistemas econômico e ecológico em diversas escalas temporais, bem como a consideração de questões com a interdependência entre os diversos agentes e a co-evolução, permite, entre outras questões, um novo olhar sobre teorias e hipóteses importantes dentro do contexto da sustentabilidade²⁰⁰.

A centralidade da variável *tempo* tem reflexos importantes também na questão metodológica propriamente dita, tanto para as teorias de crescimento econômico quanto para a análise da sustentabilidade. A simulação, neste sentido, apresenta-se como uma ferramenta singular e com enorme potencial de contribuição do desenvolvimento das referidas áreas de pesquisa.

²⁰⁰ Neste sentido, um exemplo de reenquadramento e ampliação das análises é a própria questão apontada por Stiglitz (1997), sobre as divergências em relação aos horizontes temporais de análise de Solow e Georgescu-Roegen.

O próprio exercício de modelagem apresentado no capítulo 5, embora muito simples e com claras limitações, evidencia as potencialidades do instrumento. Mesmo sem considerar especificamente o modelo construído e os resultados obtidos, saltam aos olhos as possibilidades de abertura de novas frentes de análise e reflexão para o objeto de estudo da economia ecológica.

Olhando especificamente para os resultados do exercício proposto, algumas questões particulares podem ser verificadas como, por exemplo, a composição ideal do mercado, dado um determinado cenário inicial das condições do capital natural. A definição de regras simples, dentro do modelo proposto, leva o mercado a uma estrutura ótima em relação ao número de agentes produtores e ao nível de exploração de cada um, considerando os condicionantes definidos (controle da demanda, taxação e investimento sobre o capital natural). Com algumas adaptações e refinamentos, tal modelo poderia ser aplicado a escalas locais para a verificação de composição de estruturas de mercado ideais em relação à manutenção do estoque de capital natural e, em última análise, para a sustentabilidade.

Em relação ao compartimento ambiental, o refinamento do modelo implica na construção de indicadores locais para o monitoramento do comportamento do capital natural. Estudos mais detalhados e em escala local, como os realizados por Scheffer (2009), sobre o comportamento, dinâmica e limiares de ecossistemas específicos poderiam dar suporte e validar o ajuste de parâmetros importantes do modelo, como os limiares de ruptura e de histerese, bem como indicar quais estruturas do ambiente local estariam sujeitas a tais dinâmicas.

De uma maneira geral e conceitual, o exercício possibilita algumas reflexões que podem ser extrapoladas para a economia ecológica como um todo, reforçando algumas de suas premissas mais importantes. Primeiramente, se o capital natural for considerado com um ativo importante dentro do processo de desenvolvimento, e um elemento com impacto direto no bem-estar humano, em razão de suas diversas e complexas dimensões, a análise da riqueza total deve ser relativizada a partir da leitura conjunta das curvas de crescimento econômico e capital natural total.

Mesmo nos estágios iniciais, onde há forte tendência de crescimento econômico dos agentes produtores, não é possível falar em crescimento da riqueza total. É essencial reforçar esta questão: se o capital natural for considerado como um ativo econômico, em toda a sua complexidade, o crescimento econômico nos moldes tradicionais é uma falácia, mesmo com taxas de crescimento do PIB altas. A exploração e depleção do capital natural, que reflete positivamente no PIB, na realidade, promove a descapitalização (DOWBOR, 2009) em relação a muitas funções ecossistêmicas, tão ou mais importantes ao bem estar social do que a elevação do produto interno bruto.

O processo de crescimento econômico tradicional atua na substituição de bens de natureza intangível em sua maioria, e públicos, pelo capital econômico, tipicamente privado. A criação de riqueza, quando complementada pelo capital natural, evidencia perdas cada vez mais intensas desta parcela de ativos, com prejuízos para a sociedade, principalmente quando considerado um horizonte temporal maior que o comumente adotado pelos planejadores de políticas econômicas.

Esta visão contrapõe a enorme maioria dos teóricos econômicos, que estabelecem o crescimento como uma condição indispensável para o desenvolvimento, conforme visto na introdução e no capítulo 2 deste trabalho. A consideração do capital natural dentro da equação de desenvolvimento evidencia exatamente o contrário: o processo de crescimento econômico por si só depreda uma parte da parcela pública da riqueza de um país, e a transfere para agentes privados²⁰¹. A mão invisível, neste caso, age contra o interesse público de médio e longo prazos.

Políticas econômicas pautadas no incentivo ao crescimento econômico puro e simples - como o caso brasileiro histórico e atual, desconsideram estes importantes ativos públicos e, desta forma, vão concretamente no sentido contrário do desenvolvimento. Emblemática e mais concreta ainda é a situação da China, ilustrada pela recente reportagem

²⁰¹ Importante, neste contexto, é considerar também a questão da distribuição dos produtos do crescimento econômico. O PIB *per capita* brasileiro de R\$ 21.252.41 em 2011 (IBGE, 2012a), por exemplo, não diz muita coisa quando confrontado com os dados de distribuição de renda, medidos por meio do coeficiente de GINI. Dados do recente relatório da ONU-Habitat (2012), classificam o Brasil como o quarto pior país da América Latina em termos de distribuição de renda, atrás apenas de Guatemala, Honduras e Colômbia.

da BBC²⁰², publicada no dia 06 de dezembro de 2011, que evidencia as consequências ambientais das tão celebradas altas taxas de crescimento do país, apenas analisando a questão pontual da poluição atmosférica em Pequim, que já causam prejuízos até mesmo para o tráfego aéreo local. É certo que numa condição como a apresentada, uma série de funções ecossistêmicas foram inviabilizadas, ou demandarão custos desproporcionais para sua recuperação.

Ainda neste ponto, é importante lembrar que as chamadas externalidades do processo produtivo, e a redução do bem-estar humano pela perda da resiliência ecossistêmica não são distribuídas de maneira homogênea. Martinez-Alier (2007), ao tratar dos chamados conflitos ecológicos distributivos, apresenta de maneira muito clara uma série de exemplos que ilustram como os perdedores do processo de desenvolvimento, dentro da perspectiva do capital natural, estão sempre na base da pirâmide social.

Pensar desenvolvimento apenas em termos de crescimento econômico é optar pelo caminho mais fácil e, certamente, o menos responsável. Neste sentido, é possível afirmar com segurança que a sustentabilidade depende da construção de uma nova convenção de desenvolvimento, nos moldes do conceito definido por Erber²⁰³ (2009), onde a questão ambiental seja colocada como central e estratégica, ou que ao menos considere o conceito amplo de capital natural como parte fundamental da garantia da qualidade de vida plena da sociedade.

Neste sentido, uma experiência singular, porém muito significativa, para uma nova convenção de desenvolvimento é o exemplo do Butão e de seu GNH Index²⁰⁴, que substituiu o PIB como indicador de desenvolvimento. Embora muito recente, construída dentro de uma estrutura econômica e cultural muito própria, e em uma escala quase local²⁰⁵, tal experiência

²⁰² http://www.bbc.co.uk/portuguese/videos_e_fotos/2011/12/111206_nevoa_pequim_pai.shtml

²⁰³ Convenções de desenvolvimento, segundo Eber (2009), tratam das transformações estruturais que precisam ser introduzidas na sociedade, estabelecendo qual o futuro desejável, e quais estruturas devem ser mudadas, além das agendas dessas mudanças.

²⁰⁴ *Gross National Happiness Index*, ou Índice de Felicidade Nacional Bruta. O GNH é composto por 9 domínios: Bem estar psicológico; Padrões de vida e Felicidade; Boa Governança e Felicidade Nacional Bruta; Saúde; Educação; Vitalidade comunitária; Diversidade cultural e resiliência; Uso do tempo e Felicidade; Diversidade ecológica e resiliência.

²⁰⁵ A população do Butão em 2011 era de 738.267 habitantes em uma extensão territorial de 38.394 Km² (IBGE, 2012b)

pode ser considerada como um primeiro sinal de ruptura em relação ao modelo dominante, representado pela perseguição quase irracional à elevação do PIB.

Ainda, o simples exercício apresentado no capítulo 5 traz à tona outra questão importante, que apenas aparece muito timidamente em grande parte dos trabalhos em economia ecológica²⁰⁶, que é a questão do papel do controle social e da pressão exercida pelo consumidor. A elevação dos níveis de conscientização da ponta final do ciclo econômico - os consumidores - talvez seja a estratégia mais adequada para garantir a adequação dos agentes produtores e a sustentabilidade de fato em um mundo tão complexo.

Porém, a formação de consumidores mais bem informados e conscientizados, com a capacidade de exercer um controle social eficiente sobre o sistema produtivo como um todo depende, essencialmente, de políticas públicas de educação ambiental fortes, amplas, transversais, capilarizadas e participativas, que possibilitem o desenvolvimento de um olhar crítico sobre todo o sistema político-econômico, e da cidadania em última instância.

Finalmente, é importante retomar o conceito de democracia econômica de Dowbor (2006), que se manifesta no real poder de escolha e na influência da sociedade nos rumos econômicos. Segundo o autor (op. cit.), a democracia econômica deve passar, necessariamente, pela melhor qualidade da inserção social nos processos produtivos, no acesso equilibrado aos resultados do esforço econômico e no acesso à informação que assegure o direito às opções. De fato, é fundamental reconhecer a centralidade do controle social consciente e eficiente como a variável mais importante no contexto da sustentabilidade. É imprescindível, desta forma, pensar em formas de inserir e adequar a referida variável nos modelos de crescimento econômico e de sustentabilidade.

Neste sentido, a valorização e o investimento no capital natural, e o fomento de uma consciência crítica e cidadã em todos os níveis sociais, devem ser tratados como políticas estratégicas e de justiça socioambiental, sem a qual não é possível falar em sustentabilidade de fato.

²⁰⁶ Importante, neste sentido, fazer também a *mea culpa*, visto que tal tema também não foi previsto inicialmente como objeto de análise em nenhum capítulo específico.

Referências

- ABRAMOVAY, R. **Desenvolvimento e Instituições**: a importância da explicação histórica. In: ARBIX, G; ZILBOVICIUS, M; ABRAMOVAY, R. Razões e Ficções para o desenvolvimento. São Paulo, Editora UNESP/EDUSP. 2001.
- ADELMAN, I. **Teorias do desenvolvimento econômico**. Companhia editora Forense. 1972.
- AGHION, P. AND HOWITT, P. **Endogenous Growth Theory**. Cambridge, MA. MIT Press, 1998.
- AGHION, P. E P. HOWITT. **A Model of Growth Through Creative Destruction**. *Econometrika*, Vol. (2), pp. 323-51. 1992
- AMARAL, J, F; SERRA, A. A; ESTEVÃO, J. **Economia do Crescimento**. Edições Almedina. Coimbra, 2008.
- AMAZONAS, M. C. **Economia do Meio-Ambiente**: Uma análise da abordagem neoclássica a partir de marcos evolucionistas e institucionalistas. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.
- AMAZONAS, M. C. **Desenvolvimento Sustentável e a Economia ecológica**. In: NOBRE, M; AMAZONAS, M. C. *Desenvolvimento Sustentável: a Institucionalização de um conceito*. Brasília, edições IBAMA, 2002.
- AMAZONAS, M. C. **O Pluralismo da Economia Ecológica e a Economia Política do Crescimento e da Sustentabilidade**. *Boletim da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica*. Edição especial para o VIII Encontro da ECOECO, n. 20, jan, fev, mar, abr, 2009.
- AMAZONAS, M. C. **Valor e Meio Ambiente**: Elementos para uma abordagem evolucionista. Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.
- ANDRADE, D. C; ROMEIRO, A, R. **Capital natural, serviços Ecosistêmicos e sistema econômico**: rumo a uma “Economia dos Ecosistemas”. Texto para Discussão. IE/UNICAMP. N. 159, maio 2009.
- ANGELINI, R. **Ecosistemas e Modelagem Ecológica**. In: POMPEO, M.L.M. (ed.) *Perspectivas da Limnologia no Brasil*, São Luís: Gráfica e Editora União, 198 pg., 1999.
- ARROW, K. J. **Viewpoint**. *Science*, Vol. 267, p. 1617. 1995.
- ARTHUR, W. B. **Complexity and the economy**. *Science* 284. 1999.
- ARTHUR, W. B. **On Competing Technologies and Historical Small Events**: The Dynamics of Choice Under Increasing Returns. International Institute for Applied Systems Analysis Paper WP-83-90, Laxenburg, Austria. 1983.

ATKINS, P; JONES, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

AZQUETA, D; SOTELSEK, D. **Valuing nature**: From environmental impacts to natural capital. Ecological Economics 63, 22–30, 2007.

BANKS, J. (ed.). **Handbook of Simulation**: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998.

BARRO, R. J.; SALA-I-MARTIN, X. **Economic Growth**. McGraw-Hill, 1995.

BAUMGÄRTNER, S. **Entropy**. International Society for Ecological Economics / Internet Encyclopaedia of Ecological Economics, 2003.

BAUMGÄRTNER, S; QUAAS, M, F. **Ecological-economic viability as a criterion of strong sustainability under uncertainty**. Ecological Economics 68, 2008–2020, 2009.

BEBBINGTON, J; BROWN, J; FRAME, B. **Accounting technologies and sustainability assessment models**. Ecological Economics 61, 224–236, 2007.

BECK, U. **Risk of society**: towards a new modernity. Londn: Sage, 1992.

BEINHOCKER, E. D. **The origin of wealth**: evolution, complexity and the radical remaking of economics. Harvard Business School Press. Boston, Massachusetts, 2006.

BINSWANGER, M. **Technological progress and sustainable development**: what about the rebound effect? Ecological Economics 36, 119–132, 2001.

BLIKSTEIN, P; ABRAHAMSON, D; WILENSKY, U. **NetLogo**: Where We Are, Where We're Going. In M. Eisenberg & A. Eisenberg (Eds.), Proceedings of Interaction Design & Children, Boulder, Colorado, 2005.

BOOTH, D. E. **The Environmental Consequences of Growth**. Steady- State Economics as an alternative to ecological decline. London & New York: Routledge, 1998.

BRANCO, S. M. **Ecossistêmica**: Uma Abordagem Integrada dos Problemas do Meio Ambiente. Editora Edgard Blücher. 1989

BRAND, F. **Critical natural capital revisited**: Ecological resilience and sustainable development. Ecological Economics 68 (2009) 605 – 612.

BRESSER-PEREIRA, L. C. **O conceito histórico de desenvolvimento econômico**. Trabalho originalmente preparado para curso de desenvolvimento econômico na Fundação Getúlio Vargas. 2006.

BRESSER-PEREIRA, L. C. **O modelo Harrod-Domar e a substitutibilidade de fatores**. Estudos Econômicos, 5 (3), setembro, 7-36, 1975.

BRUE, S. L. **História do Pensamento Econômico**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2005.

CARVALHO, T. S; ALMEIDA, E. **A Hipótese da Curva de Kuznets Ambiental Global**: Uma Perspectiva Econométrico-Espacial. Est. econ., São Paulo, v. 40, n. 3, p. 587-615, JULHO-SETEMBRO. 2010.

CARVALHO, R. S. **A Cobrança pelo uso da Água**: uma abordagem desse instrumento e gestão de recursos hídricos. Dissertação apresentada à Escola de Governo da Fundação João Pinheiro. Belo Horizonte, 2003.

CARVALHO, V. R. S. **Três ensaios sobre competitividade externa e desempenho econômico na década de 2000**. Tese de doutorado apresentada ao Departamento de Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

CAVIGLIA-HARRIS, J. L; CHAMBERS, D; AND KAHN, J. R. **Taking the “U” out of Kuznets**: A comprehensive analysis of the EKC and environmental degradation. Ecological Economics, vol. 68, p 1149-1159, 2009.

CECHIN, A. D. **Georgescu-Roegen e o desenvolvimento sustentável**: diálogo ou anátema? Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

CECHIN, A; VEIGA, J. E. **A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen**. Revista de Economia Política, vol 30, nº 3 (119), pp 438 – 454, julho/setembro, 2010.

CECHIN, A; VEIGA, J. E. **O fundamento central da Economia Ecológica**. In: MAY, Peter (org) Economia do meio ambiente: teoria e prática, 2ª ed, RJ: Elsevier/Campus, 2010, p. 33-48.

CHAMBERS, N; SIMMONS, C; WACKERNAGEL, M. **Sharing Natures Interest**: Ecological Footprints as an Indicator for Sustainability. Earthscan, London, 2000.

CHEN, B.; CHEN, G. Q. **Modified ecological footprint accounting and analysis based on embodied energy – a case study of the Chinese society**. Ecological Economics 61, 355-376, 2007.

CHIESURA, A; DE GROOT, R. **Critical natural capital**: a sócio-cultural perspective. Ecological Economics 44: 219 – 231. 2003.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

COELHO, D. S. **Ensaio sobre o desenvolvimento econômico**: uma abordagem neo-Schumpeteriana aplicada à economia brasileira. Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Administração, Economia e Contabilidade da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

COMMON, M. S. **Sustainability and policy**. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 1995.

COMMON, M., STAGL, S. **Ecological economics**: an introduction. Cambridge: University Press. 2005.

CORAZZA, G. **Malthus e Ricardo**: duas visões de economia Política e de Capitalismo. Cadernos IHU Idéias. Ano 3 - nº 39 - 2005 - 1679-0316. Universidade do Vale do Rio Sinos. São Leopoldo/RS, 2005b.

CORAZZA, R. I. **Tecnologia e meio ambiente no debate sobre os limites do crescimento**: Notas à luz de contribuições selecionadas de Georgescu-Roegen. *Economia*, Brasília(DF), v.6, n.2, p.435–461, Jul./Dez. 2005a.

COSTA, R. V. **Introdução**. In: SCHUMPETER, J. A. Teoria do Desenvolvimento Econômico: uma investigação sobre Lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico. Coleção Os Economistas. Ed. Nova Cultura, 1997.

COSTANZA, R; D'ARGE, R; DE GROOT, R. S; FARBER, S; GRASSO, M; HANNON, B; LIMBURG, K. NAEEM, S; O'NEILL, R. V; PARUELO, J; RASKIN, R. G; SUTTON, P; VAN DEN BELT, M. **The value of the world's ecosystem services and natural capital**. *Nature* 387:253–60, 1997.

COSTANZA, R; DALY, H. E. **Natural capital and sustainable development**. *Conservation Biology*, vol. 6. N. 1. Mar, 1992.

COSTANZA, R; NORTON, B. G; HASKELL, B. D. (ed). **Ecosystem health**: New goals for environmental management. Washington, DC: Island Press, 1992.

COSTANZA, R; WAINGER, L; FOLKE, C. MALER, K. G. **Modeling Complex Ecological Economic Systems**: Toward an evolutionary, dynamic understanding of people and nature. *BioScience*, Vol. 43, No. 8, pp. 545-555, Sep., 1993.

DALY, H. E. **A Steady-State Economy**: A failed growth economy and a steady-state economy are not the same thing; they are the very different alternatives we face. Sustainable Development Commission, UK, April 24, 2008.

DALY, H. E. **Beyond Growth**: The Economics of Sustainable Development, Boston, Massachusetts: Beacon Press, 1996.

DALY, H. E. **Elements of environmental macroeconomics**. In: COSTANZA, R. (Org.) *Ecological economics: the science and management of sustainability*. New York: Columbia University Press, 1991a.

DALY, H. E. **Steady-State Economics**: Second Edition with New Essays. Island Press, Washington, DC, 1991b.

DALY, H. E; FARLEY, J. **Economia Ecológica**: Princípios e Aplicações. Instituto Piaget: Lisboa. 2004.

DAMACEANU, R, C. **An agent-based computational study of wealth distribution in function of resource growth interval using NetLogo**. *Applied Mathematics and Computation* 201, 371–377, 2008.

DAVID, P. A. **Clio and the Economics of QWERTY**. American Economic Review, Vol. 75(2), pp. 332-7. 1985.

DAVID, P. A. **Understanding the Economics of QWERTY: The Necessity of History**. In William N. Parker (ed.), Economic History and the Modern Economist, New York: Basil Blackwell. 1986.

DE GROOT R.S; WILSON M.A; BOUMANS R.M. J. **A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services**. Ecol. Econ. 41: 393-408. 2002.

DELFIN NETTO, A; IKEDA, A. **Estratégias de desenvolvimento**. In: SICSÚ, J; CASTELLAR, A. (org.). Sociedade e Economia: Estratégias de crescimento e desenvolvimento. Brasília: Ipea, 2009.

DELUIZ, N; NOVICKI, V. *Trabalho, meio ambiente e desenvolvimento sustentável: implicações para uma proposta de formação crítica*. In: Boletim Técnico do Senac, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, maio/ago, p. 18-29, 2004.

DIETZ, S; NEUMAYER, E. **Genuine savings: a critical analysis of its policy-guiding value**. Int. J. Environment and Sustainable Development, Vol. 3, Nos. 3/4, 2004.

DIETZ, S; NEUMAYER, E. **Weak and strong sustainability in the SEEA: Concepts and measurement**. Ecological Economics 61, 617-626, 2007.

DINDA, S. **Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey**. Ecological Economics 49 p. 431– 455. 2004.

DOMINGOS, J. D. **Ambiente e Desenvolvimento Sustentável: Perspectivas e Políticas para o Desenvolvimento Regional**. Intervenção inaugural no Seminário sobre Ambiente e Desenvolvimento Sustentável: Perspectivas e Políticas para o Desenvolvimento Regional, Lisboa, 12-13 Outubro 1998.

DOSI, G. **Opportunities, Incentives and the Collective Patterns of Technological Change**. The Economic Journal, Vol. 107, pp. 1530-47. 1997.

DOWBOR, L. **Democracia Econômica: Um passeio pelas teorias**. 2006. Disponível em: dowbor.org/10demoecovozes3.doc.

DOWBOR, L. **Indicadores: Afinal, o que Estamos Medindo?** In: LOUETTE, A. Indicadores de Nações: uma Contribuição ao Diálogo da Sustentabilidade: Gestão do Conhecimento / organização, pesquisa, textos e captação de recursos. 1.ed. São Paulo: WHH – Willis Harman House, 2009. Vários Colaboradores.

EFFECT – ECONOMICS FOR THE ENVIRONMENT CONSULTANCY. **The Economic, Social and Ecological Value of Ecosystem Services: A literature review**. Final report prepared for The Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra). January, 2005.

EKINS, P. **Economic Growth and Environmental Sustainability: the Prospects for Green Growth**, Routledge, London/New York. 2000.

EKINS, P; SIMON, S. **An illustrative application of the CRITINC framework to the UK.** Ecological Economics 44: 255 – 275, 2003.

EKINS, P; SIMON, S; DEUTSCH, L; FOLKE, C; DE GROOT, R. **A framework for the practical application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability.** Ecological Economics 44: 165 – 185, 2003.

EL SERAFY, S. **The environment as capital.** In: COSTANZA, R. (ed.) Ecological Economics, Columbia University Press, New York, 1991

ENGLAND, R. W. **Natural capital and the theory of economic growth.** Ecological Economics 34, p 425–431, 2000.

ENGLAND, R. W. **Should we pursue measurement of the natural capital stock?** Ecological Economics 27, 257–266, 1998.

ENGLISH NATURE. **Establishing criteria for identify critical natural capital in the terrestrial environment:** a discussion papper. English Nature Research Raports, n. 141. 1995.

ERBER, F. **As convenções de desenvolvimento no governo Lula:** um ensaio de economia política. Revista de economia política, v. 31, n. 1 (121), jan/mar 2011.

FAVERO, O. A. **Paisagem e sustentabilidade na bacia hidrográfica do rio Sorocaba (SP).** Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

FBDS - Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. **Energia e Economia Verde:** cenários futuros e políticas públicas. Coleção de estudos sobre diretrizes para uma economia verde no Brasil, 2012.

FENDT, R. **Desenvolvimento é o aumento persistente da produtividade do trabalho.** In: Sociedade e Economia: Estratégias de crescimento e desenvolvimento. Org: SICSÚ, J; CASTELLAR, A. Brasília: Ipea, 2009.

FERREIRA, A. N. **Teoria Macroeconômica e Fundamentos Microeconômicos.** Tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

FIERZ, M. S. M. **As abordagens sistêmicas e do equilíbrio dinâmico na análise da fragilidade ambiental do litoral do Estado de São Paulo:** contribuição à geomorfologia das planícies costeiras. Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

FMI - Fundo Monetário Internacional. **World Economic Outlook** - October 2010. Recovery, Risk, and Rebalancing. Washington, DC : International Monetary Fund, 2010.

FOLKE, C. et. al. **Resilience and Sustainable Development:** Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. Edita Norstedts Tryckeri AB: Stockholm, 2002.

FOLKE, C. **Resilience**: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16, 253–267, 2006.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**. 2.ed., Visual Books, 2008.

FURTADO, C. **O mito do desenvolvimento econômico**. Rio de Janeiro, Paz e Terra, 1974.

FURTADO, C. **Criatividade e dependência na civilização industrial**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1978.

GASPARATOS, A; SCOLOBIG, A. **Choosing the most appropriate sustainability assessment tool**. *Ecological Economics* 80, 1–7, 2012.

GEORGESCU-ROEGEN, N. **The Entropy Law and the Economic Process**. Cambridge, MA: Harvard University Press. 1971

GIDDENS, A. **As consequências da modernidade**. São Paulo: Ed. UNESP, 1991.

GLOBAL FOOTPRINT NETWORK. **Glossary**. Disponível em www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/glossary/. Acesso em 10 de março de 2012.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E; de GROOT, R; LOMAS, P. L; MONTES, C. **The history of ecosystem services in economic theory and practice**: From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics* 69, 1209–1218, 2010.

GONG, M., WALL, G. **On exergy and sustainable development**, part II: methods, applications and suggestions. *Exergy, An International Journal* 1, 217–233, 2001.

GORDON, R. J. **Macroeconomia**. 7. Edição. Porto Alegre, RS: Bookman, 2000.

GREMAUD, A. P. *et al.* **Manual de Economia**. Organizadores: PINHO, D. B; VASCONCELOS, M. A. S. 4. Ed. São Paulo: Saraiva, 2003.

GREMAUD, A. P. *et al.* **Manual de Introdução à economia**. Organizadores: PINHO, D. B; VASCONCELOS, M. A. S. São Paulo: Saraiva, 2006.

GROSSMAN, G; HELPMAN, E. **Innovation and Growth in the Global Economy**. Cambridge, Mass.: MIT Press. 1991.

GROSSMAN, G; KRUEGER. A. **Economic Growth and the Environment**. *Quarterly Journal of Economics*, v.110, n.2, 1995.

GUNDERSON, L. H; ALLEN, C. R. **Why Resilience? Why Now?**. In: GUNDERSON, L. H; ALLEN, C. R; HOLLING, C. S. (ed). *Foundations of Ecological Resilience*. Island Press, 2009.

HABERL, H; FISCHER-KOWALSKI, M; KRAUSMANN, F; WEISZ, H; WINIWARTER, V. **Progress towards sustainability?** What the conceptual framework of material and energy flow accounting (MEFA) can offer. *Land Use Policy* 21, 199–213, 2004.

HALL, R. LIEBERMAN, M. **Macroeconomia: Princípios e aplicações**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

HAMILTON, K. **Green Adjustments to GDP**. Resources Policy 20 (3): 155–68. 1994.

HANLEY, N. D; SPASH, C. L. **Cost–Benefit Analysis and the Environment**. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, 1993.

HANSEN, G. D. **Malthus to Solow**. Federal Reserve Bank of Minneapolis. Research Department Staff Report 257. January 1999.

HARDIN, G. **The Tragedy of the Commons**. Science, 162. 1968.

HARRIS, J. M; GOODWIN, N. R. **Reconciling Growth and Environment**. In: New Thinking in Macroeconomics: Social, Institutional and Environmental Perspectives. Edward Elgar Publishing, 2003.

HARTMANN, S. (1996) **The Word as a process**: Simulations in the Natural and Social Sciences. In: HEGSELMANN, R; MUELLER, U; TROITZSCH, K. G. (editors). Modelling and simulation in the social sciences: From the philosophy of science point of view, volume 23 of Series A: Philosophy and methodology of the social sciences, pp. 77-100. Kluwer Academic Publishers.

HARTWICK, J. **Intergenerational Equity and the investing of rents from exhaustible resources**. American Economic Review, 67, 972-974, 1977.

HODGSON, G. M. **Economics and Evolution**: bringing life back into economics. The University of Michigan Press. 1993.

HOFFMANN, R. **Distribuição de renda e crescimento econômico**. Estudos Avançados vol.15 n.41 São Paulo Jan./Apr. 2001.

HOLLING, C. S. **Resilience and Stability of Ecological Systems**. In: GUNDERSON, L. H; ALLEN, C. R; HOLLING, C. S. (ed). Foundations of Ecological Resilience. Island Press, 2009.

HOLLING, C. S. **Theories for sustainable futures**. Conservation Ecology 4(2): 7, 2000.

HOTELLING, H. **The Economics of Exhaustible Resources**. J. Polit. Econ., 39, PP. 137-75. April, 1931

HUNT, E. K. História do pensamento econômico. Rio de Janeiro: ed. Campus, 2005.

IBELINGS, B.W., PORTIELJE, R., LAMMENS, E.H.R.R., NOORDHUIS, R., VAN DEN BERG, M.S., JOOSSE, W., MEIJER, M.L **Resilience of Alternative Stable States during the Recovery of Shallow Lakes from Eutrophication**: Lake Veluwe as a Case Study. Ecosystems 10, 4–16. 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contas Nacionais Trimestrais**. Indicadores IBGE. Indicadores de Volume e Valores Correntes. Brasília. Outubro / Dezembro 2010.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatísticas do Século XX**. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Centro de Documentação e Disseminação de Informações. Rio de Janeiro. 2006.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Portal Países@**. Acesso em 20 de agosto de 2012b.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Portal Séries Estatísticas e Séries Históricas**. Tems: contas nacionais. Acesso em 22 de agosto de 2012a.

JACKSON, T. **Prosperity without growth**: economics for a finite planet. Earthscan, 2009.

JACKSON, T; VICTOR, P. **Productivity and work in the 'green economy'**: Some theoretical reflections and empirical tests. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1 101–108. 2011.

JONES, C. I. **Introdução à Teoria do Crescimento Econômico**. Rio de Janeiro: Editora Campus. 2000

JONES, C. I. **R&D Based Models of Economic Growth**. *Journal of Political Economy*, Vol. 103(4), pp. 759-784. 1995.

JORGENSEN, S. E. **Eco-Exergy as Ecological Indicator**. In: JORGENSEN, S. E; XU, F. L; COSTANZA, R. (ed). *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. CRC Press, 2010.

JORGENSEN, S. E; XU, F. L; MARQUES, J. C; SALAS, F. **Application of Indicators for the Assessment of Ecosystem Health**. In: JORGENSEN, S. E; XU, F. L; COSTANZA, R. (ed). *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. CRC Press, 2010.

KABERGER, T.; MANSSON, B. **Entropy and economic processes – physics perspectives**. *Ecological Economics*, v.36, p.165-179, 2001.

KAMOGAWA, L. F. O. **Crescimento econômico, consumo de energia e qualidade ambiental**: modelos intergeracionais sob à luz da hipótese EKC. Tese apresentada Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2008.

KAY, J. J. **An introduction to systems thinking**. In: WALTNER-TOEWS, D; KAY, J, J; LISTER, N. M. E. *The ecosystem approach: complexity, uncertainty and managing for sustainability*. Columbia University Press, 2008.

KAY, J; SCHEIDER, E. D. **Thermodynamics and measures of ecological integrity**. In: *Ecological Indicators*. Elsevier, 1992.

KINDLEBERGER, C. P; HERRICK, B. **Economic development**. E ed. New York: McGraw-Hill, 1977.

KPMG. **Expect the Unexpected**: Building business value in a changing world. Swiss: KPMG International Cooperative, 2012.

KUZNETS, S. *Economic Growth and Income Inequality*. *American Economic Review*, v.45, n.1. 1955.

LAPLANE, M. **Joseph A. Schumpeter**: Inovações e dinâmica Capitalista. In: CARNEIRO, R. Os Clássicos da Economia. Vol. 2. São Paulo: Ed. Ática, 1997.

LI, H; GAO, Y. **A GDP fluctuation model based on interacting firms**. Physica A 387 (2008) 5225–5230.

LIMA, R. B; RUA, M. G. **Cotidiano, racionalidade e sereias**: o “dilema do prisioneiro” como metáfora da questão ambiental. Sociedade e Estado, Brasília, v. 18, n. 1/2, p. 41-66, jan./dez. 2003

LIMBURG, K, E; O’NEILL, R, V; COSTANZA, R; FARBER, S. **Complex systems and valuation**. Ecological Economics 41 (2002) 409–420.

LINTZ, A. C. **Dinâmica das bolhas especulativas e finanças comportamentais**: um estudo aplicado ao mercado de câmbio brasileiro. Tese apresentada ao Departamento de Administração da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

LUCAS, R. E. **On the mechanics of economic development**. Journal of Monetary Economics, v22, p. 3-42, 1988.

LUCENA, A. F. P. **Estimativa de uma Curva de Kuznets Ambiental aplicada ao uso de energia e suas implicações para as emissões de carbono no Brasil**. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro. PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MAIA, J. M. **Economia Internacional e Comércio Exterior**. Ed. São Paulo - Atlas, 2004.

MANKIW, N. G. **Introdução à economia**: princípios de micro e macroeconomia. Rio de Janeiro: Campus, 2001.

MANKIW, N. G. **Macroeconomia**. 6. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MARTINEZ ALIER, J. **O Ecologismo dos Pobres**: Conflitos Ambientais e linguagens de valoração. São Paulo: Contexto, 2007.

MCDONNELL, S; ZELLNER, M. **Exploring the effectiveness of bus rapid transit a prototype agent-based model of commuting behavior**. Transport Policy 18, 825–835, 2011.

MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being**. Current state and trends: findings of the Condition and Trends Working Group / edited by Rashid Hassan, Robert Scholes, Neville Ash. 2005.

MILLER, J. H; PAGE, S. E. **Complex Adaptive System**: an introduction to computational models of social life. Princeton University Press, 2007.

MIROWSKI P. **More heat than light**. Cambridge University Press, 1989.

MISHAN, E. L. **The costs of economic growth**. Westport Praeger, 1993.

MITCHELL, M. **Complexity**: a guided tour. New York: Oxford University Press, 2009.

MORICOCCHI, L; GONÇALVES, J. S. **Teoria do desenvolvimento econômico de schumpeter**: uma revisão crítica. Informações Econômicas, SP, v.24, n.8, ago. 1994.

MUELLER, C. C. **O debate dos economistas sobre a sustentabilidade** – uma avaliação sob a ótica da análise do processo produtivo de Georgescu-Roegen. Estud. Econ. vol.35 no.4 São Paulo Oct./Dec. 2005.

MUELLER, C. C. **Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente**. Brasília: UNB – Finatec, 2007.

MULLER, C. C. **Economia, Entropia e Sustentabilidade**: abordagem e visões de futura da Economia da Sobrevivência. Est. Econ., São Paulo, V. 29, N. 4, p. 513-550, Out-Dez. 1999.

NARDO, M; SAISANA, M; SALTELLI, A; TARANTOLA, S; HOFFMAN, A; GIOVANNINI, E. **Handbook on Constructing Composite Indicators**: Methodology and User Guide. Organisation for Economic Cooperation and Development and Joint Research Centre of the European Commission, Paris and Ispra, 2008.

NAZARETH, J. M; GUTIEREZ, C. **Os modelos macroeconômicos de crescimento e o crescimento demográfico**. Análise Social, Vol. XI 2.º, 3.º, n.º 42-43, pp. 336-364, 1975.

NELSON, R. R. **As fontes do crescimento econômico**. Clássicos da Inovação. Campinas: Editora da UNICAMP. 2006.

NELSON, R. R. **Physical and Social Technologies, and Their Evolution**. Working Paper Series. Columbia University. 2003.

NELSON, R. R; WINTER, S. G. **Neoclassical vs. Evolutionary Theories of Economic Growth: Critique and Prospectus**. The Economic Journal, Vol. 84, No. 336 Dec., pp. 886-905. 1974.

NELSON, R. R; WINTER, S. G. **Uma teoria evolucionária da mudança econômica**. Clássicos da Inovação. Campinas: Editora da UNICAMP. 2005.

NELSON, R. R; WINTER, S. **Toward an Evolutionary Theory of Economic Capabilities**. American Economic Review, Vol. 63, pp. 440-9. 1973.

NEUMAYER, E. **Weak versus Strong Sustainability**: Exploring the limits of two opposing paradigms. Second edition. Edward Elgar, 2003.

NORGAARD, R. **Development Betrayed**: the end of progress and a coevolutionary revisioning of the future. Routledge, New York, 1994.

NUNES, R. **Evolução do pensamento econômico sobre a sustentabilidade**: os limites do crescimento. Trabalho apresentado no II SISCA. São Paulo, junho, 2010. Disponível em: www.sisca.com.br/II-Simposio/pdf/Nunes_artigo.pdf. Acesso em: 10 de junho de 2011.

O'CONNOR, M. **Natural capital**. Policy Research Brief Series, n. 3, Cambridge Research for the Environment, 1999.

ODUM, E. P. **The strategy of ecosystem development**. Science 164:262–70, 1969. ODUM, E. P. **Fundamentals of ecology**. Philadelphia: W. B. Saunders Co, 1971.

ODUM, H.T. **Environmental Accounting: Emery and Environmental Decision Making**. Wiley and Sons Inc., New York, 1996.

O'NEILL, J. **Building Better Global Economic BRICs**. Global Economics Paper No: 66. 2001.

ONU-HABITAT - PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS. **Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012**: Rumbo a una nueva transición urbana. ONU-Habitat, Agosto del 2012.

PAGE, S. E. **Understanding Complexity**. Chantilly, VA: The Teaching Company, 2009. DVD.

PARKIN, M. **Macroeconomia**. 5.ed. São Paulo: Pearson, 2003.

PAVARINA, P. R. J. P. **Desenvolvimento, Crescimento Econômico e o Capital Social do Estado de São Paulo**. Tese de doutorado apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2003.

PEARCE, D. W. ATKINSON, G. **Capital Theory and the Measurement of Sustainable Development: An Indicator of Weak Sustainability**.” Ecological Economics 8 (2): 103–108. 1993.

PEARCE. D; MORAN. D. **O Valor Econômico da Biodiversidade**. Lisboa: Inst. Piaget. 1994.

PEREIRA JR., A; ROCHA, A. **Auto-organização físico-biológica e a origem da consciência**. In: D'Ottaviano, I. M. L; Gonzales, M. E. Q. Auto-organização: estudos interdisciplinares. Coleção CLE, v. 30, 2000.

PESSOA, A. C. S. **Tecnologia e crescimento económico**: o caso português no contexto da OCDE. Tese de Doutoramento em Economia apresentada à Faculdade de Economia da Universidade do Porto. Porto, 2003.

PILLARISETTI, J. R. **The World Bank's 'genuine savings' measure and sustainability**. Ecological Economics 55, 599 – 609, 2005.

PIMENTEL, L. A. S. **Fluxos de Capitais Externos, Crescimento e Desenvolvimento Econômico: Evidências de Causalidade**. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2007.

PORTO, M. F; MARTINEZ-ALIER, J. **Ecologia política, economia ecológica e saúde coletiva**: interfaces para a sustentabilidade do desenvolvimento e para a promoção da saúde. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 23 Sup 4:S503-S512, 2007.

POSSAS, S. **Adam Smith**: Valor, capital e riqueza nos primórdios da economia política. In: CARNEIRO, R. (org.). Os clássicos da economia. Editora ática, 2002.

PRADO, E. F. S. **A ortodoxia neoclássica**. Estud. av., São Paulo, v. 15, n. 41, Apr. 2001 .

PRIGOGINE, I. **Thermodynamics of irreversible processes**. New York: John Wiley and Sons, 1955.

PRUGH, T. *et al.* **Natural Capital and Human Economic Survival**. 2. Ed. ISEE Press, Solomons, Maryland. 1999.

RAILSBACK, S. F; GRIMM, V. **Agent-based and Individual-based Modeling**: A Practical Introduction. Princeton University Press, 2010.

RANJAN, R, SHORTLE, J. S. **The Environmental Kuznets Curve When the Environment Exhibits Hysteresis**. *Ecological Economics*. 64(15): 204-215. 2007.

RANT, Z. **Exergie**: ein neues wort für technische arbeitsfähigkeit. Forschung Gebiet Ingenieurwesens 22, 36–37, 1956.

ROMEIRO, A. R. **Economia ou economia política da sustentabilidade**. In: MAY, P. H; LUSTOSA, M. C; VINHA, V. Economia do meio ambiente. Rio de Janeiro: Campus, p. 1-29, 2003.

ROMER, D. **Advanced macroeconomics**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

ROMER, P. **Increasing returns and long-run growth**. Journal of Political Economy, 94, p. 1002-1037, 1986.

ROMER, P. M. **Endogenous Technological Change**. Journal of Political Economy, Vol. 98(5), pp. S71-102. 1990.

ROSENBERG, N. **Por dentro da caixa-preta**: tecnologia e economia. Clássicos da Inovação. Campinas: Editora da UNICAMP. 2006.

ROTHERING, F. **Natural Capital as Metaphor and Concept**. Needs and Limits: Redirecting our Civilization. 2008.

SACHS, I. **Prefácio**. In: VEIGA, J. E. Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Garamond, 2005. p. 09-11.

SAMUELSON, P. **Economics**. New York: McGraw-Hill, 1955.

SANDRONI, P. **Novíssimo Dicionário de Economia**. São Paulo: Best Seller, 2001.

SANTOS, J. J. C . S. **Aplicação da Neguentropia na Modelagem Termoeconômica de Sistemas**. Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2009.

SASAHARA, C. **Sustentabilidade**: a perda do caráter de mudança estrutural do conceito. Dissertação de mestrado apresentada à Escola Superior de Agricultura Luiz d Queiroz. Piracicaba, 2009.

SCHEFFER, M. **Critical transitions in nature and society**. Princeton University Press, Princeton, 2009.

SCHEFFER, M; CARPENTER, S. **Catastrophic regime shifts in ecosystems**: linking theory to observation. *TRENDS in Ecology and Evolution* Vol.18 No.12 December 2003.

SCHEFFER, M; CARPENTER, S; FOLEY, J. A; FOLKE, C; WALKER, B. **Catastrophic Shifts in Ecosystems**. *Nature* 413, 2001.

SCHRODINGER, E. **What is life?** The physical aspect of the living cell. Cambridge University Press, 1944.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do Desenvolvimento Econômico**: Uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico. Coleção Os Economistas. Ed. Nova Cultural, 1997.

SELDEN, T.M; SONG, D. **Environmental quality and development**: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? *Journal of Environmental Economics and Management*, v.27, n.1, 1994.

SEN, A. **Desenvolvimento como liberdade**. São Paulo: Companhia das Letras, 2010.

SEN, A. **The Living Standard**. *Oxford Economic Papers*, Vol. 36, 74-90. Supplement: Economic Theory and Hicksian Themes, 1984.

SERÔA DA MOTTA, R. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Amazônia Legal, 1998.

SHAFIK, N.; BANDYOPADHYAY, S. **Economic growth and environmental quality**. Washington: The World Bank, 1992.

SILVA, N. C; RITTER, O, M; HAMBURGER, E. W. **Instalação Museológica para Demonstração de Fenômenos Caóticos**. In: XV Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2003, Curitiba. Anais do XV Simpósio Nacional de Ensino de Física. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física, 2003. v. 1. p. 1-11.

SILVA-FILHO, E. G; CARVALHO, E. B. **A Teoria do Crescimento Endógeno e o Desenvolvimento Endógeno Regional**: Investigação das Convergências em um Cenário Pós-Cepalino. *Revista Econômica do Nordeste*, Fortaleza, v. 32, n. Especial p. 467-482, novembro 2001.

SILVEIRA, S. J. C. **Externalidades negativas**: as abordagens neoclássica e institucionalista. *Rev. FAE*, Curitiba, v.9, n.2, p.39-49, jul./dez. 2006

SINISGALLI, P. A. A. **Valoração dos danos ambientais de hidrelétricas**: estudos de caso. Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas. 2005.

SIRVINSKAS, L. P. **Manual de Direito Ambiental**. 6ª. edição. São Paulo: Saraiva, 2008.

SMITH, A. **A riqueza das Nações**: investigando sobre sua natureza e suas causas. Volume I, Coleção Os Economistas, Editora Nova Cultural, 1996.

SOLOW, R. **A Contribution to the Theory of Economic Growth**. Quarterly Journal of Economics, 70, 65-94. 1956

SOLOW, R. **An almost practical step toward sustainability**. Resources Policy, v. 19, n. 3, p. 162-172, sept. 1993.

SOLOW, R. **Intergenerational Equity and Exhaustible Resources**. Review of Studies Economis, v. 41, p. 29-45, 1974.

SOLOW, R. **Technical Change and the Aggregate Production Function**. Review of Economics and Statistics, 39, 312-320. 1957.

SONWDON, B; VANE, H. R. **Modern Macroeconomics**: Its Origins, Development and Current State. Edward Elgar Publishing Limited, 2005.

SOROS, G. **The New Paradigm for Financial Markets**: The Credit Crisis of 2008 and What It Means. Nova York: PublicAffairs, 2008.

SOUSA, A. R. **Do modelo neoclássico de crescimento de SOLOW ao modelo de Vantagens Competitivas Dinâmicas**. Revista de Ciências Sociais e Políticas, n.º 3, ISCSP, 2009.

SOUZA, M. C. A. **Crescimento Econômico, Inovação e Empreendedorismo**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

SOUZA, N. J. **Desenvolvimento Econômico**. 4. ed. São Paulo, Atlas, 1999.

STIGLITZ, J. E. **Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz**. Ecological Economics 22, 269–270, 1997.

STIGLITZ, J. E; WALSH, C. E. **Introdução à Macroeconomia**. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

STIGLITZ, J. **Growth with exhaustible natural resources**: efficient and optimal growth paths. Rev. Econ. Studies, 123–137. 1974.

TANIMOTO, A. H. **A economia medida pela Análise de Fluxo de Massa (AFM)**: A desmaterialização da economia nos países desenvolvidos sustentada pelos recursos naturais dos países emergentes, a exemplo do Brasil. Tese de doutorado submetida ao centro de desenvolvimento sustentável da Universidade de Brasília. Brasília, 2010.

TEEB. **The Economics of Ecosystem Services and Biodiversity**. Earthscan, London, 2010.

TEIXEIRA, R. A. **Positivismo, historicismo e dialética na metodologia da economia**. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

THIRLWALL, A. P. **Growth and development**. 6th edition. London: Palgrave-Macmillan, 1999.

TISUE, S; WILENSKY, U. **NetLogo: A Simple Environment for Modeling Complexity**. Presented at the International Conference on Complex Systems, Boston, May 16–21, 2004.

TOWNSEND, C. R; BEGON, M; HARPER, J. L. **Fundamentos em ecologia**. 2º edição. Porto Alegre: Artmed, 2006.

TRIVELATO, G. C. **Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos**. INPE-9665-NTC/358. INPE, São José dos Campos. 2003.

TURNER, R.K. (Ed.). **Sustainable Environmental Economics and Management: Principles and Practice**. Belhaven Press, New York. 1993.

UHLMANN, G. W. **Teoria Geral dos Sistemas: Do Atomismo ao Sistemismo** (Uma abordagem sintética das principais vertentes contemporâneas desta Proto-Teoria). Instituto Siegen, São Paulo, 2002. Disponível em <http://www.institutosiegen.com.br/documentos/Teoria%20Geral%20dos%20Sistemas.pdf>.

UNITED NATIONS. **Integrated environmental and economic accounting 2003**. Handbook of National Accounting. Series F, No 61, Rev. 1. New York, 2003.

VASSÃO, C. A. **Arquitetura livre: complexidade, metadesign e ciência nômade**. Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

VEBLEN, T. **Why is economics not an evolutionary science?** Reprinted (1998) in Cambridge Journal of Economics 1998, 22, 403-414.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento e crescimento econômico**: Pelo menos 13 das nações com alto IDH estão entre as sociedades mais insustentáveis do planeta, com desastrosos desempenhos ambientais. Valor, São Paulo, 22 de abril de 2003.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento Sustentável**. O Desafio do Século XXI. Rio de Janeiro: Garamond. 2005.

VOINOV, A. **Systems science and modeling for ecological economics**. Academic Press, 2008.

VOLCHAN, S. B; VIDEIRA, A. A. P. **Reversibilidade microscópica versus irreversibilidade macroscópica na mecânica estatística clássica**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, no. 1, Março, 2001.

VON BERTALANFFY, L. **General system theory: Essays on its foundation and development**, rev. ed. New York: George Braziller, 1968.

WALDROP, M. M. **Complexity**: the emerging science at the edge of order and chaos. New York: Simon & Schuster, 1992.

WORLD BANK. **Expanding the Measure of Wealth**. Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs Series, vol. 17. Washington D.C. 1997

WORLD BANK. **Where is the Wealth of Nations?** Measuring Capital for the XXI Century. 2005.

ZOGRAFOS, C; HOWARTH, R. (Eds.). **Deliberative Ecological Economics**. Oxford University Press, Oxford, 2008.

DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS

```
Globals [ kn-total-inicial
            P-preco
            X-lucro-agregado
            porcentagem-linear-histerese
            porcentagem-ruptura-histerese
            LRD
            LSH-D
            Preco
            KN-TOTAL
            ruptura-demanda?
            porcentagem-noTEX-RD
            C-Custo-Taxacao
            kn-e
            kn-max
            melhor-patch
            distance-kn-max
            disp-atual-patch?
        ]

patches-own
    [ kn-patch
      LR
      LSH
      comportamento-patch?
      histerese?
      disponibilidade?
    ]

turtles-own
    [ Q-producao
      A-capital
       $\pi$ -lucro
      raio-visao-kn
      CT-custos-totais
      TE
    ]
```

SETUP

```
to setup
    __clear-all-and-reset-ticks
    set kn-total-inicial qualidade-ambiental-inicial
    setup-patches
    setup-turtles
    setup-demanda
end
```

to setup-patches

```
set porcentagem-linear-histerese (0.5 - 0.15)*(random-float 100) + 15
set porcentagem-ruptura-histerese (0.5 - 0.15)*(random-float 100) + 15
set porcentagem-noTEX-RD (0.2 - 0.05)*(random-float 100) + 5
ask patches
[ set histerese? false
  set disponibilidade? false
  set LSH 0
  set comportamento-patch? false
  if (random-float 100) <= qualidade-ambiental-inicial
    [ set kn-patch kn-total-inicial ]
  ]
repeat 15 [diffuse kn-patch 0.5]
set KN-TOTAL sum [ kn-patch ] of patches
ask patches
[ set kn-patch floor kn-patch
  ifelse (random-float 100) >= Patches-comportamento-ruptura
    [ set comportamento-patch? false
      ifelse (random-float 100) <= porcentagem-linear-histerese
        [ set histerese? true
          set LSH kn-patch * ( (0.5 - 0.1) * (random-float 1) + 0.1 )
        ]
        [ set histerese? false ]
      ]
    [ set comportamento-patch? true
      set LR ((0.6666 - 0.333) * random-float 1 + 0.333) * kn-patch
      ifelse (random-float 100) <= porcentagem-ruptura-histerese
        [ set histerese? true
          set LSH LR * ( (0.5 - 0.1) * (random-float 1) + 1.1 )
        ]
        [ set histerese? false ]
      ]
    ]
  recolor-patch
]
```

end**to recolor-patch**

```
ifelse comportamento-patch?
[ ifelse (kn-patch <= LR)
  [ set pcolor 13 ]
  [ set pcolor scale-color green kn-patch 0 kn-total-inicial ]
]
[ set pcolor scale-color green kn-patch 0 kn-total-inicial ]
```

end

to setup-turtles

```
set-default-shape turtles "circle 2"
crt Numero-inicial-agentes
[ set size 1
  set color yellow
  set A-capital ( random 100 + 1 )
  setxy random-xcor random-ycor
  set TE (Taxa-exploracao-inicial / 100)
]
if hide-agentes? [ask turtles [hide-turtle]]
recolor-turtles
```

end**to recolor-turtles**

```
let capital-max max [A-capital] of turtles
ask turtles
[ ifelse (A-capital <= capital-max / 3)
  [set color red
   set raio-visao-kn (5 - 1) * (random-float 1) + 1]
  [ ifelse (A-capital <= (capital-max * 2 / 3))
    [ set color yellow
     set raio-visao-kn (10 - 5) * (random-float 1) + 5
    ]
    [ set color blue
     set raio-visao-kn (25 - 10) * (random-float 1) + 10
    ]
  ]
]
```

end**to setup-demanda**

```
set ruptura-demanda? false
set Preco 1.5
set LRD (Limite-Ruptura-Demanda * sum [kn-patch ] of patches)
set LSH-D LRD * ( (0.3 - 0.1) * random-float 1 + 1.1 )
```

end

GO

to go

```
ask patches [ dinamica-kn ]
ask turtles [ dinamica-agente ]
if Demanda?
  [ ifelse ruptura-demanda?
    [ if KN-TOTAL > LSH-D
      [ set ruptura-demanda? false
```

```

        set Preco 1.5
      ]
    ]
    [ if KN-TOTAL < LRD
      [ set ruptura-demanda? true
        set Preco 1.1
        ask turtles
          [ if random-float ( 100 ) >= percentagem-noTEX-RD and TE > 0.1
            [ set TE TE * 0.975 ]
          ]
        ]
      ]
    ]
  ]
  ]
  let lista-produção sort [Q-producao] of turtles
  let QA-producao-agregada ( sum lista-produção )
  let lista-lucro sort [  $\pi$ -lucro ] of turtles
  set X-lucro-agregado sum lista-lucro
  tick
end

```

DINÂMICA DOS PATCHES

to dinâmica-kn

```

  ifelse comportamento-patch?
    [ comportamento-ruptura ]
    [ comportamento-linear ]

```

end

to comportamento-linear

```

  set kn-patch kn-patch * (1 + (taxa-regeneracao-max / 100))
  if (kn-patch > 100) [ set kn-patch 100 ]
  if kn-patch <= 0 [ set kn-patch 0.1 ]
  ifelse histerese?
    [ ifelse disponibilidade?
      [ if kn-patch = 0
        [ set disponibilidade? false ]
      ]
      [ if kn-patch >= LSH
        [ set disponibilidade? true ]
      ]
    ]
    [ ifelse kn-patch > 0
      [ set disponibilidade? true ]
      [ set disponibilidade? false ]
    ]
  ]

```

recolor-patch

end

to comportamento-ruptura

```

set kn-patch kn-patch * (1 + (taxa-regeneracao-max / 100))
if (kn-patch > 100) [ set kn-patch 100 ]
if kn-patch <= 0 [ set kn-patch 0.1 ]
ifelse histerese?
  [ ifelse disponibilidade?
    [ if kn-patch < LR
      [ set disponibilidade? false ]
    ]
    [ if kn-patch >= LSH
      [ set disponibilidade? true ]
    ]
  ]
[ ifelse kn-patch < LR
  [ set disponibilidade? false ]
  [ set disponibilidade? true ]
]
Recolor-patch
end

```

DINÂMICAS DOS AGENTES

to dinamica-agente

```
;; Função produzir - PARTE 1: Escolher o melhor Kn para explorar
```

```

ifelse ( not empty? [ kn-patch ] of patches in-radius (raio-visao-kn) )
  [ set kn-max max [ kn-patch ] of patches in-radius (raio-visao-kn)
    set melhor-patch max-one-of patches in-radius (raio-visao-kn) [kn-patch ]
    set distance-kn-max distance melhor-patch
    ask melhor-patch [set disp-atual-patch? disponibilidade ]
  [ set kn-patch 0
    set disp-atual-patch? false
    set distance-kn-max 0
  ]
if kn-patch < 1 [ set disponibilidade? false ]

```

```
;; Função produzir - PARTE 2: Produzir
```

```

ifelse (disp-atual-patch?) and (A-capital > 0)
  [ let kn-utilizavel (kn-max * TE)
    let kn-residual (kn-max - kn-utilizavel)
    set Q-producao (kn-utilizavel * Eficiencia-tecnologica)
    ask melhor-patch [set kn-patch kn-residual ]
    set A-capital (A-capital - kn-utilizavel)
    set KN-TOTAL sum [ kn-patch ] of patches
    if KN-TOTAL < 0 [set KN-TOTAL 0.1]
  ]
[set Q-producao 0]

```

```

;; Função produzir - Parte 3: Custos
let C-producao Q-producao * (0.02 * (1 + distance-kn-max ))
if (Taxacao?)
  [ ifelse  $\pi$ -lucro > 5
    [ set C-Custo-Taxacao (Preco * Q-producao * Tx-Eco) / 100
      set kn-patch kn-patch * (1 + (Tx-Eco / 100) + (taxa-regeneracao-max / 100))
    ]
    [ set C-Custo-Taxacao 0
      set kn-patch kn-patch * (1 + (taxa-regeneracao-max / 100))
    ]
  ]
set CT-custos-totais (C-producao + C-Custo-Taxacao)
set  $\pi$ -lucro ((Preco * Q-producao) - CT-custos-totais - 0.1)
set A-capital (A-capital +  $\pi$ -lucro)
if A-capital > 0
  ;; Função produzir - Parte 4: Alterar TE
  [set raio-visao-kn ceiling rai o-visao-kn]
  ifelse empty? [ kn-patch ] of patches in-radius (raio-visao-kn)
    [ set kn-e 0 ]
    [ set kn-e max [kn-patch] of patches in-radius (raio-visao-kn) ]
  if ( not ruptura-demanda? and ( $\pi$ -lucro > 0) and kn-e > 0 and TE <= 0.9975)
    [ set TE TE * 1.025 ]
  if (ruptura-demanda? and kn-e > 0 and TE > 0.1) or (Q-producao = 0)
    [ set TE TE * 0.975 ]
  if A-capital <= 0 [die]
end

```

a) Substituição dos agentes no mercado

O modelo proposto não contempla a substituição dos agentes de saem do mercado, visto que um dos objetivos da simulação era entender qual o nível ótimo de agentes operando sobre determinado ambiente. Porém, caso haja o interesse, os agentes poderiam ser substituídos a cada "morte", através da inserção de um código simples dentro das dinâmicas do agentes: *if A-capital <= 0 [set-initial-turtle-vars]*

b) Faixas de variação das variáveis LR, LSH, porcentagem-linear-histerese, porcentagem-ruptura-histerese e LSH-D.

As referidas variáveis são definidas por meio dos seguintes códigos:

```
set LR ((0.6666 - 0.333 ) * random-float 1 + 0.333) * kn-patch
set LSH kn-patch * ( (0.5 - 0.1) * (random-float 1) + 0.1)
set LSH-D LRD * ( (0.3 - 0.1) * random-float 1 + 1.1 )
set porcentagem-linear-histerese (0.5 - 0.15) * (random-float 100) + 15
set porcentagem-ruptura-histerese (0.5 - 0.15) * (random-float 100) + 15
```

Para a definição da faixa de variação das variáveis com escolha aleatória, o código padrão utilizado é: *(os extremos dos valores da faixa) * random-float 1 + extremo inferior da faixa de variação) * variável de referência*. Para os casos das porcentagens, o limite do random-float é 100.

c) Definição do raio de visão dos agentes

Os raios dos agentes são definidos pelo seguinte código:

```
to recolor-turtles
  let capital-max max [A-capital] of turtles
  ask turtles
    [ ifelse (A-capital <= capital-max / 3)
      [ set color red
        set raio-visao-kn (5 - 1) * (random-float 1) + 1]
      [ ifelse (A-capital <= (capital-max * 2 / 3))
```



```

        [set color yellow
        set raio-visao-kn (10 - 5) * (random-float 1) + 5
        ]
        [set color blue
        set raio-visao-kn (25 - 10) * (random-float 1) + 10] ]
    ]
end

```

Da mesma forma que ocorreu no item (b), a redefinição do tamanho do raio dos *patches* é baseada na seguinte lógica: *set raio-visao-kn (os extremos dos valores da faixa) * (random-float 1) + extremo inferior da faixa de variação.*

d) Preço e percepção ambiental

A definição do preço adotado pelo mercado é realizada pelo seguinte código:

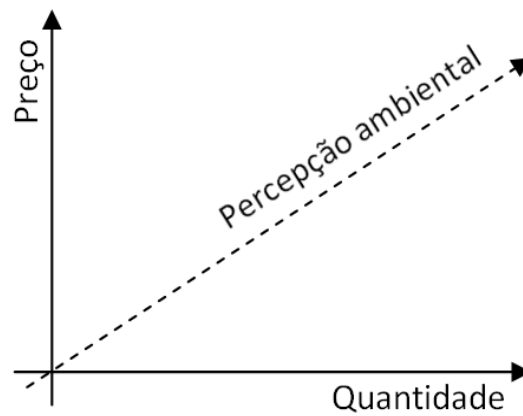
```

if Demanda?
  [ ifelse ruptura-demanda?
    [ if KN-TOTAL > LSH-D
      [ set ruptura-demanda? false
      set Preço 1.5
      ]
    ]
  [ if KN-TOTAL < LRD
    [ set ruptura-demanda? true
    set Preço 1.1
    ask turtles
      [ if random-float ( 100 ) >= percentagem-noTEX-RD and TE > 0.1
        [ set TE TE * 0.975 ]
      ]
    ]
  ]
]

```

Uma possibilidade de extensão do modelo seria a definição de uma função preço, a partir da quantidade produzida pelo mercado e, caso a demanda fosse acionada, também pela percepção ambiental.

Neste sentido, a função preço deverá considerar três eixos, conforme figura abaixo:



e) Alteração da Taxa de exploração

A alteração da taxa de exploração dos agentes é dada pelo seguinte código:

```
if ( not ruptura-demanda? and ( $\pi$ -lucro > 0) and kn-e > 0 and TE <= 0.9975)
  [ set TE TE * 1.025 ]
if (ruptura-demanda? and kn-e > 0 and TE > 0.1) or (Q-producao = 0)
  [ set TE TE * 0.975 ]
```

Desta forma, a suavização ou intensificação da alteração, a cada rodada, deve ser alterada por meio do coeficiente.