



DA COMPLEXIDADE DO MEIO AMBIENTE À AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS DOS ECOSISTEMAS

Andre do Nascimento Moreno Fernandes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Rio de Janeiro
Maio de 2017

DA COMPLEXIDADE DO MEIO AMBIENTE À AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS
DOS ECOSISTEMAS

Andre do Nascimento Moreno Fernandes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO.

Examinada por:

Prof. Carlos Alberto Nunes Cosenza, D.Sc.

Prof. Francisco Antonio de Moraes Accioli Doria, D.Sc.

Prof. Getúlio Marques Martins, D.Sc.

Prof. Harvey José Santos Ribeiro Cosenza, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MAIO DE 2017

do Nascimento Moreno Fernandes, Andre

Da Complexidade do Meio Ambiente à Avaliação de Serviços dos Ecossistemas/Andre do Nascimento Moreno Fernandes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XI, 91 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Produção, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 88 – 91.

1. Economia Ambiental. 2. Valoração Ambiental.
3. Desenvolvimento Sustentável. I. Alberto Nunes Cosenza, Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção.
- III. Título.

Para Tita, João e Malu.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao professor Carlos Cosenza pela maneira jovial com que me incentivou a desenvolver este trabalho.

Agradeço também as contribuições dos professores Francisco Doria, Getúlio Martins e Harvey Cosenza que se dispuseram a comentar e avaliar esta dissertação.

Agradeço à Finep, fundamental para eu pudesse concluir este projeto ao permitir a flexibilidade de minhas horas de trabalho.

Ao amigo Roberto Neves, agradeço as nossas conversas e as mensagens de incentivo.

Obrigado Cristina Fernandes, por ter acompanhado de perto este projeto e por criar condições para que eu pudesse realizá-lo.

Finalmente, agradeço aos professores da Coppe que, a cada disciplina, me ajudaram a identificar e desenvolver o meu tema de pesquisa.

Muito obrigado a todos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DA COMPLEXIDADE DO MEIO AMBIENTE À AVALIAÇÃO DE SERVIÇOS DOS ECOSISTEMAS

Andre do Nascimento Moreno Fernandes

Maio/2017

Orientador: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Programa: Engenharia de Produção

Ao longo dos últimos anos, tem-se alcançado relativo consenso entre cientistas e governos nacionais de que a atividade econômica mundial - baseada principalmente em fontes de energia fósseis poluentes com exploração de recursos naturais finitos - está relacionada aos impactos antropogênicos no meio ambiente, dos quais o processo de elevação da temperatura média do planeta Terra é um exemplo absolutamente transversal. A presente dissertação discorre sobre os esforços para a inclusão do meio ambiente no processo decisório dos agentes econômicos, norteado pelo paradigma do desenvolvimento sustentável que não assume o meio ambiente como um obstáculo intransponível ao desenvolvimento econômico. No âmbito da economia do meio ambiente, são apresentados modelos relevantes que investigaram o uso ótimo de recursos naturais renováveis e não renováveis. Já na economia da poluição, são discutidas as principais características dos instrumentos econômicos à disposição dos governos para perseguir o nível desejado de poluição. Ao identificar o sistema econômico como um subsistema do meio ambiente, a relação de complexidade entre o meio ambiente e a produção econômica é reconhecida no sentido de que os diversos ecossistemas proporcionam um fluxo de serviços ao homem e, portanto, geram bem-estar. Finalmente, se este fluxo de serviços gera bem-estar, sob um ponto de vista utilitarista, é possível valorar os serviços ambientais. Dessa maneira, são apresentados os principais métodos propostos para a valoração dos serviços ambientais, assim como um exemplo prático de um estudo já publicado que objetivou valorar o serviço de remoção de fósforo prestado por um pantanal que recebe efluentes urbanos e industriais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FROM ENVIRONMENT'S COMPLEXITY TO VALUATION OF
ECOSYSTEMS SERVICES

Andre do Nascimento Moreno Fernandes

May/2017

Advisor: Carlos Alberto Nunes Cosenza

Department: Production Engineering

Over the last few years, there has been a relative consensus among scientists and national governments that the global economic activity – mainly based on polluting fossil fuels with exploitation of finite natural resources – is related to anthropogenic impacts on the environment, of which the process of raising the average temperature of planet Earth is an absolutely transverse example. This work discusses efforts to include environment in the decision-making process of economic agents, guided by the paradigm of sustainable development that does not recognize the environment as an insurmountable obstacle to economic development. In the field of environmental economics, relevant models are presented that investigate the optimal use of renewable and non-renewable natural resources. In the pollution economics field, the main features of the economic instruments available to governments to pursue the desired level of pollution are discussed. By identifying the economic system as a subsystem of the environment, the complex relationship between the environment and economic production is acknowledged in the sense that the various ecosystems provide a flow of services to men and thus generate welfare. Finally, if this flow of services generates welfare, from a utilitarian point of view, it is possible to value environmental services. In this way, the main proposed methods for ecosystem services valuation are presented, as well as a practical example of an already published study that aimed to value the service of phosphorus removal from a wetland receiving urban and industrial effluents.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
1 Introdução	1
2 Produção Econômica Sustentável	5
2.1 Limites ao Crescimento?	5
2.1.1 Paradigmas: Economia x Meio Ambiente	11
3 Ecossistemas e Impactos Antropogênicos	13
3.1 Um pouco de Ecologia	13
3.2 Ecossistemas: Sistema de Suporte à Vida	16
3.3 Impactos Antropogênicos	17
4 O Meio Ambiente como um Sistema Complexo	22
4.1 Complexidade: O que é?	23
4.2 Conceituando o Meio Ambiente como um Sistema Complexo	25
5 Economia dos Recursos Naturais e da Poluição	27
5.1 Fundamentos da Economia do Meio Ambiente	27
5.1.1 Métodos em Economia	27
5.1.2 Equilíbrio de Mercado e Falhas de Mercado	30
5.1.3 Sustentabilidade Fraca e Forte	33
5.1.4 Regra de Hartwick	36
5.2 Recursos Não Renováveis	37
5.2.1 Nível Ótimo de Extração de Recursos Não Renováveis e Regra de Hotelling	38
5.2.2 Críticas a Hotelling	40
5.2.3 Fatores que Influenciam o Ritmo de Extração	41
5.3 Recursos Renováveis	42
5.3.1 Modelo Estático de Gestão	42

5.3.2	Modelo VPL Máximo	48
5.3.3	Comparando os Modelos Estático e VPL Máximo para Ex- ploração de Recursos Renováveis	50
5.4	Economia da Poluição	51
5.4.1	Nível Ótimo de Poluição	51
5.4.2	Teorema de Coase	52
5.4.3	Papel do Governo	55
5.4.4	Taxação Pigouviana	55
5.4.5	Certificados Negociáveis de Emissões	58
5.4.6	Subsídios	60
5.4.7	CrITÉrios Para a Seleção de Instrumento de Regulação	60
5.5	Economia Ecológica	61
6	Valoração Ambiental: Métodos e Exemplos	64
6.1	Valoração Ambiental: O Que é?	64
6.2	Valoração Ambiental: Por Que Valorar?	65
6.3	Categorias de Valor de Bens e Serviços Ambientais	67
6.4	Métodos de Valoração	69
6.4.1	Agrupamento de Métodos segundo o TEEB	71
6.5	Um Exemplo Prático de Valoração Ambiental: Artigo sobre Va- loração do Serviço de Remoção de Fósforo por um Pantanal	79
6.5.1	Objetivo	79
6.5.2	Metodologia	79
6.5.3	Justificativa	80
6.5.4	Substitutibilidade Funcional	80
6.5.5	Descrição do Modelo Biogeoquímico	81
6.5.6	Resultados do Modelo Autobiótico	82
6.5.7	Valorando o Serviço de Remoção de Fósforo	82
6.5.8	Comentários Gerais sobre o Artigo	83
7	Conclusão	86
	Referências Bibliográficas	88

Lista de Figuras

2.1	Quando o crescimento é ruim (fonte: DALY [1]).	9
5.1	Incluindo o meio ambiente: representação das relações entre a atividade econômica humana e o meio ambiente (fonte: COMMON e STAGL [2]).	31
5.2	Substitutibilidade entre capital (K) e recursos naturais (R). Isoquantas para três tipos de função de produção (fonte: PERMAN <i>et al.</i> [3]).	36
5.3	Crescimento da população refletindo sua dependência em relação ao nível da população como na equação 5.5, onde $G(S) = gS(1 - \frac{S}{S_{max}})$.(fonte: PERMAN <i>et al.</i> [3]).	43
5.4	Equilíbrios Bioeconômicos no Modelo Estático - Acesso Privado e Livre Acesso	47
5.5	Nível Ótimo de Poluição ocorre quando $B_{Mg}PL = C_{Mg}E$, no qual o nível de produção econômica é Q^*	53
5.6	Determinação da taxa ótima	56
5.7	Determinação da taxa ótima por meio da análise do custo marginal de abatimento	57
6.1	Abordagens para a estimativa dos valores da natureza. (fonte: TEEB [4]).	68

Lista de Tabelas

5.1	Soluções analíticas para o equilíbrio bioeconômico no modelo estático - livre acesso e acesso privado	46
6.1	Componentes do Valor Econômico Total (TEV)	69
6.2	VPL (6%, 20 anos) do serviço do ecossistema como função da concen- tração de fósforo na entrada. Grifo para a concentração atual. Fonte: reprodução de COMELLO <i>et al.</i> [5]	83

Capítulo 1

Introdução

O termo sustentabilidade é de forma geral utilizado para designar o desenvolvimento que é viável economicamente, que não prejudica excessivamente o ambiente e é socialmente justo. O desenvolvimento sustentável é, pois, aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades (BRUNDTLAND *et al.* [6]). Prevê a preservação de recursos ambientais e culturais para as gerações futuras, o respeito à diversidade e a redução das desigualdades sociais. Para buscá-lo, é preciso perseguir o desenvolvimento econômico com uma qualidade de vida crescente para toda a população. Por outro lado, o uso de recursos naturais deve ser decrescente. Fazer mais com menos. E isso requer mudanças na produção, no modelo de negócios e no consumo (JACKSON [7]).

O desenvolvimento sustentável relaciona-se com os objetivos da engenharia de produção enquanto disciplina na medida em que a busca pela sustentabilidade do desenvolvimento econômico deve ensejar mudanças profundas no arranjo e na composição dos sistemas produtivos atuais como, por exemplo, aquelas debatidas no âmbito da ecologia industrial (AYRES [8]). Lembramos que compete à engenharia de produção, segundo definição adotada pelo *American Institute of Industrial Engineering* (AIIE) e pela Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABEPRO), o projeto, a implantação, a melhoria e a manutenção de sistemas produtivos integrados, envolvendo homens, materiais e equipamentos, especificando, prevendo e avaliando os resultados obtidos destes sistemas.

No entanto, quais são as mudanças profundas nos sistemas produtivos a que nos referimos? A presente dissertação fundamenta-se na constatação de que, ao longo dos últimos anos, tem-se alcançado relativo consenso entre cientistas e governos nacionais de que a atividade econômica mundial - baseada principalmente em fontes de energia fósseis poluentes e na exploração de recursos naturais finitos - está relacionada ao processo de elevação da temperatura média do planeta Terra. A ratificação por 195 países, em dezembro de 2015, do Acordo de Paris, ao fim da 21^a Conferência

das Partes (COP21) é uma evidência bastante recente deste consenso. O Acordo de Paris ratificou o imperativo da migração da atividade econômica mundial para uma economia de baixo carbono, com redução de emissões de gases do efeito estufa, a fim de limitar o aumento da temperatura média mundial a um patamar muito abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, buscando ainda esforços para limitar este aumento a 1,5°C.

Ocorre que os diversos ecossistemas do planeta, em geral, são caracterizados por uma estabilidade delicada em que, pequenas alterações em condições iniciais, podem gerar significativas mudanças contribuindo, por exemplo, para severas alterações no ambiente ou para o desaparecimento de espécies (WILSON [9]). Nesse sentido, os ecossistemas correspondem a um grupo de componentes ou partes que interagem de forma complexa e congregam elevado número de variáveis interligadas em constante mudança. Tais mudanças são por vezes decorrentes de eventos naturais, como se observa na própria evolução geológica e na composição da atmosfera do planeta, assim como podem ser provocadas pelo ação humana, como o radical aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera ao longo do século XX. Este aumento da concentração de CO_2 é decorrente essencialmente da queima de combustíveis fósseis, que até então estavam aprisionados no solo, com o intuito de gerar energia e a conseqüente liberação final do CO_2 à atmosfera.

Ao longo da segunda metade do século XX, a população humana mais que dobrou, superando recentemente a marca de 7 bilhões de pessoas. Estimativa mais recente da Organização das Nações Unidas (ONU) indica que a população mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050. O rápido crescimento da população mundial, aliado às formas de produção econômica e ao modo de vida adotado atualmente, que privilegia a produção e o consumo de bens às custas da intervenção deliberada no ambiente, intensificam as questões relacionadas com o meio ambiente. Assim, muitos dos impactos ambientais provocados pelo homem são resultados diretos ou indiretos do grande número de pessoas e da ocupação desordenada do espaço com grande aglomeração da população nas cidades, assim como da utilização intensiva de recursos renováveis e não renováveis na produção econômica.

Por exemplo, tendo em vista o crescimento previsto para a população mundial e o esperado aumento da renda média nos países em desenvolvimento, prevê-se expressivo aumento na demanda mundial por alimentos. Assim, como superar o desafio de aumentar a produção mundial de alimentos em um cenário de utilização comedida de recursos naturais tais como solo e água e de restrições nas emissões de dióxido de carbono? Dada a estrutura atual do sistema de produção de bens e serviços da humanidade - considerando o seu nível tecnológico, a ocupação do espaço, as formas de geração de energia, os arranjos industriais, a utilização e descarte de materiais, entre outros fatores - e o padrão de consumo destes bens e serviços, qual

é o número máximo de indivíduos de nossa espécie que podem ter suas necessidades supridas sem comprometer a capacidade da Terra de suprir as necessidades deste mesmo número de indivíduos no futuro? A resposta à esta questão está, na verdade, relacionada ao conceito de capacidade de suporte da Terra que, por sua vez, se relaciona com o conceito de sustentabilidade de espécies e ecossistemas.

Aqui podemos enumerar algumas das mudanças nos sistemas produtivos que podem decorrer da busca pela sustentabilidade. Nesse sentido, necessitamos de inovações tecnológicas que propiciem a utilização integral de matérias primas e energia, eliminando desperdícios. Adicionalmente, devemos concentrar esforços na produção de energia renovável. Necessitamos de um modelo de negócios e de consumo que propicie melhor comunicação sobre sustentabilidade da produção conduzindo ao consumo consciente e ao comércio justo. Necessitamos implantar definitivamente os conceitos de logística reversa, no qual o material sem condições de ser reutilizado retorna ao seu ciclo produtivo ou vai para o de outra indústria como insumo, evitando uma nova busca por recursos na natureza. Temos a oportunidade da migração de produtos para serviços, a chamada desmaterialização da economia. Necessitamos do florescimento de empresas que buscam dar acesso à população de baixa renda a produtos e serviços dos quais este grupo ainda não dispõe. E, finalmente, necessitamos que a globalização entregue desenvolvimento, progresso, qualidade de vida e igualdade para todos os povos.

Com os efeitos sobre o planeta decorrentes do modelo de produção sendo gradativamente mais reconhecidos, observa-se que a regulação ambiental dos mercados torna-se cada vez mais restritiva. Adicionalmente, a expectativa é que haja uma tendência por parte dos consumidores no sentido de adequar seus hábitos de consumo e de exigir uma produção econômica mais sustentável por parte das empresas. Contudo, é importante notar que a consciência ambiental moderna é relativamente recente, alegadamente inaugurada na década de 1960 com o livro *Primavera Silenciosa*, de Rachel Carson. Até poucas décadas atrás, a questão ambiental era um componente menos relevante para a tomada de decisões em projetos e para o desenvolvimento de produtos (GOLEMAN [10]). A própria teoria econômica passou a agregar elementos ecológicos - considerando aspectos como poluição, esgotamento de recursos naturais e a destruição dos ecossistemas - de uma maneira mais fundamental por uma de suas escolas de pensamento apenas a partir da década de 1970 (FERNANDEZ [11]).

Nesse sentido, uma linha de pesquisa que tem se desenvolvido nas últimas décadas é a avaliação monetária de serviços ambientais, ou valoração ambiental. De forma geral, esta linha de pesquisa decorre da constatação de que o ambiente presta uma série de serviços ambientais que geram bem-estar e, portanto, podem ser valorados sob um ponto de vista antropocêntrico. Ademais, a inadequação do

mercado para conduzir o consumo de diversos recursos ambientais a um nível ótimo cria uma oportunidade para a internalização dos custos ambientais a partir da valoração ambiental. Finalmente, a valoração ambiental é uma ferramenta adequada para suportar o processo decisório de projetos que impactam o ambiente e a gestão de recursos ambientais.

O objetivo central desta dissertação é discorrer sobre os esforços para a inclusão do meio ambiente no processo decisório dos agentes econômicos. Inicialmente, é apontada a relação de complexidade existente entre o meio ambiente e a produção econômica, apresentando uma visão sistêmica do modelo de produção vigente e seus limites biofísicos. Para tanto, o meio ambiente será conceituado como um sistema complexo que abarca o sistema econômico e fornece uma miríade de serviços ambientais. A fim de fundamentar as técnicas de avaliação de serviços ambientais, será apresentado um panorama dos esforços teóricos da ciência econômica no sentido de incluir o ambiente em seu arcabouço. E, por fim, serão apresentados os principais métodos de valoração ambiental e um exemplo prático da aplicação de um dos métodos apresentados.

Para dar conta de abordar os assuntos apontados nesta introdução, os quais possuem um aspecto transdisciplinar relacionando desde temas de ecologia e meio ambiente à economia e valoração ambiental, a presente dissertação é dividida em 7 capítulos além desta introdução. O capítulo 2 procura descrever o que é sustentabilidade do ponto de vista da economia, discorrendo sobre os supostos limites impostos ao crescimento econômico. O capítulo 3 apresenta alguns conceitos de ecologia que são de fundamental importância para entender a relação de complexidade do ambiente com a produção econômica. Neste capítulo 3 serão detalhadas as categorias de serviços prestados pelo ambiente e, finalmente, serão descritos alguns dos principais impactos antropogênicos no ambiente, como o aumento da temperatura média mundial. Já o capítulo 4 descreve o que é complexidade e procura conceituar o ambiente como um sistema complexo. O capítulo 5 apresenta o embasamento teórico do economia do meio ambiente e da economia da poluição, discorrendo sobre temas como exploração de recursos renováveis e não renováveis, determinação de nível ótimo de poluição e aplicação de instrumentos econômicos para redução da poluição. Finalmente, o capítulo 6 é dedicado a apresentação do embasamento teórico da valoração ambiental, bem como, a apresentação de um exemplo de estudo que aplicou técnica de valoração de serviços ambientais, a saber: o método de custos de reposição. A dissertação é finalizada com o capítulo 7, que procura sintetizar as conclusões gerais do trabalho.

Capítulo 2

Produção Econômica Sustentável

2.1 Limites ao Crescimento?

O PIB¹ mundial atingiu 78 trilhões de dólares americanos correntes em 2014 (UN [13]). Segundo dados da Divisão de Estatísticas da Organização das Nações Unidas (ONU), desde 1970 até 2014, a produção econômica mundial apresentou um singular crescimento de 286% em termos reais, isto é, em 44 anos o nível de produção no mundo foi multiplicado por 3,8, embutindo uma taxa composta de crescimento anual de 3,1%. Por outro lado, a população mundial, que em 1970 era de 3,6 bilhões de pessoas (UN [14]), dobrou de tamanho para 7,3 bilhões de indivíduos em 2014 (UN [13]). Estimativa mais recente da ONU indica que a população mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050. Estas duas tendências explicam o aumento consistente da renda *per capita* mundial nas últimas décadas que atingiu, em 2014, US\$ 10.742 anuais (UN [13]). Se por um lado o aumento da população foi expressivo, o crescimento da produção econômica mundial mais do que o compensou, resultando em acréscimos na renda *per capita* mundial.

O que está por trás deste desempenho econômico espetacular dos países quando avaliados em seu conjunto? Esta evolução histórica aponta para quais perspectivas no futuro? Este capítulo, de maneira geral, pretende abordar a questão da sustentabilidade do crescimento econômico, discorrendo sobre fatores que contribuíram para tal desempenho e relacionando-os aos fatores que supostamente limitam o cresci-

¹PIB, Produto Interno Bruto, é o valor total de todos bens e serviços finais produzidos na economia durante um dado período, normalmente um ano (KRUGMAN e WELLS [12]). É a soma dos bens e serviços finais na medida em que exclui os bens e serviços intermediários, aqueles que são produzidos como insumos para a produção de outros bens. O intuito desta exclusão é evitar múltiplas contagens. Outras exclusões importantes referem-se a bens usados, bens e serviços produzidos no exterior e ativos financeiros. O PIB inclui, no entanto, os gastos de investimentos, inclusive mudanças nos estoques, as quais configuram investimento em vendas futuras. Uma decomposição macroeconômica do PIB bastante útil é: $PIB = C + I + G + X - IM$, onde C denota os gastos de consumo, I corresponde ao investimento, G refere-se às compras de bens e serviços pelo governo, X denota as exportações e, finalmente, IM corresponde aos gastos com importações. O PIB é, portanto, uma medida da atividade econômica.

mento econômico.

Para DUPAS [15], a partir das décadas de 1960 e 1970, que ficaram conhecidas como a idade de ouro do capitalismo, o crescimento econômico veio em conjunto com o progresso técnico-científico, associado ao domínio crescente da natureza e ao aumento da produtividade nas sociedades capitalistas industrialmente desenvolvidas (DUPAS [15]). Este crescimento econômico propiciou aumento no nível de renda e, por consequência, acréscimo no nível de afluência dos indivíduos destes países. Dessa maneira, a busca pelo crescimento econômico, medido em termos da variação do PIB, passou a ser, talvez, a principal meta política dos países e condição necessária para o atingimento da prosperidade, então entendida simplificada como aumento no nível de renda (JACKSON [7]).

Mais do que uma meta política, o crescimento econômico passou a ser entendido como necessário para evitar que as economias nacionais entrassem em colapso. Isso porque, segundo explica JACKSON [7], os países estão submetidos a uma dinâmica na qual melhorias contínuas na produtividade - através do aumento da produtividade dos insumos da função de produção, trabalho e capital - baixam os custos dos produtos e estimulam a demanda, contribuindo para um aumento da produção em um mecanismo de *feedback*. Porém, o próprio aumento da produtividade do trabalho significa que menos trabalhadores são necessários para produzir a mesma quantidade de produtos. Enquanto a economia nacional está em crescimento, novos postos de trabalho são gerados a ponto de compensar os postos perdidos. Se, por outro lado, a economia não está em crescimento, então haverá desemprego, diminuindo o poder de compra e a confiança do consumidor e, finalmente, reduzindo ainda mais a demanda por bens e serviços. Com a redução do consumo, as empresas reduzem os investimentos, gerando mais desemprego. Assim, estão lançadas as bases para um ciclo de recessão econômica.

Diante do reconhecimento de que o crescimento da produção é tão essencial para as economias modernas, em especial para os países em desenvolvimento que almejam o aumento do nível de renda e afluência de sua população, é que se coloca a questão da sustentabilidade da produção econômica. A indagação sobre a sustentabilidade decorre de questões éticas acerca da responsabilidade que temos com as futuras gerações e das implicações que nossas decisões possuem sobre o bem-estar futuro (PERMAN *et al.* [3]). Economistas utilizam o termo sustentabilidade para designar o desenvolvimento que é viável economicamente, que não prejudica excessivamente o ambiente e é socialmente justo. O desenvolvimento sustentável é, pois, aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades (BRUNDTLAND *et al.* [6]). Prevê a preservação de recursos ambientais e culturais para as gerações futuras, o respeito à diversidade e a redução das desigualdades sociais. PERMAN *et al.* relacionam

várias definições para conceito de sustentabilidade:

1. É um estado no qual a utilidade (ou consumo) é não-declinante através do tempo.
2. É um estado no qual recursos são gerenciados de forma a manter as possibilidades de produção para no futuro.
3. É um estado no qual o estoque de capital natural² é não-declinante através do tempo.
4. É um estado no qual os recursos são gerenciados de forma a manter uma taxa sustentável de serviços provenientes destes recursos.
5. É um estado que satisfaz as condições mínimas para a resiliência dos ecossistemas através do tempo.
6. É a adoção do desenvolvimento sustentável como premissa para a construção de consensos e desenvolvimento institucional.

Sob uma visão economicista, a sustentabilidade corresponde, portanto, à manutenção das possibilidades de produção econômica para as futuras gerações. No entanto, ainda nas décadas de 1960 e 1970 começaram a surgir estudos que, em última análise, colocavam em dúvida a sustentabilidade do modelo político-econômico baseado estritamente na perseguição do crescimento econômico, questionando principalmente os efeitos no meio ambiente advindos da intensificação da produção econômica e fazendo referência às limitações ambientais decorrentes da exploração de recursos ambientais. Até então, a questão ambiental era um componente menos relevante para a tomada de decisões em projetos de investimento e para o desenvolvimento de produtos, por exemplo (GOLEMAN [10]). A própria teoria econômica passou a agregar elementos ecológicos - considerando aspectos como poluição, esgotamento de recursos naturais e a destruição dos ecossistemas - de uma maneira mais fundamental apenas a partir da década de 1970 (FERNANDEZ [11]).

A obra que, em 1962, alegadamente inaugurou esta consciência ambiental moderna foi o livro *Primavera Silenciosa*, de Rachel Carson, que é a primeira grande denúncia sobre os efeitos adversos do uso indiscriminado de defensivos químicos (CARSON [16]). Outro estudo que exerceu grande influência internacional sobre o debate da sustentabilidade econômica foi o relatório, publicado por pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) em 1972, intitulado *Limits to Growth*.

²Alguns economistas conceituam o meio ambiente em termos de ativos que proveem fluxos de serviços. Nesse sentido, capital natural corresponde aos ativos do meio ambiente.

Segundo a obra *Limits to Growth*, limites ambientais causariam um colapso do sistema econômico mundial em até 100 anos, se as taxas de crescimento na população mundial, industrialização, poluição, produção de comida e depleção de recursos perdurassem como no início da década de 1970 (MEADOWS *et al.* [17]). Foram construídas simulações em computador para o sistema econômico mundial que pudessem investigar as cinco maiores tendências globais inter-conectadas, na visão de seus autores: aceleração da industrialização, rápido crescimento populacional, disseminação da subnutrição, depleção de recursos naturais não renováveis e a deterioração do meio ambiente. Dessa forma, este modelo incorporou limites ambientais relacionados à disponibilidade de terras e produtividade da agricultura, aos limites de recursos não renováveis disponíveis para extração e ao limite da capacidade do meio ambiente em assimilar os rejeitos da produção econômica.

Embora o relatório *Limits to Growth* tenha sido entendido muitas vezes como excessivamente catastrofista, sua mensagem final afirma ser possível atingir, não sem sacrifício, um estado sustentável para economia mundial. De fato, com base em suas simulações, os autores propuseram que seria possível atingir a estabilidade econômica e ecológica no futuro. Este modelo estabilizado do mundo embutia restrições tais como: limitação do tamanho da população, restrição ao crescimento do capital investido ao nível da depreciação, reciclagem de recursos e controle da poluição. Também mostraram que, quanto antes fossem adotadas as políticas restritivas, maiores seriam as chances de sucesso no atingimento da estabilidade econômica e ecológica (MEADOWS *et al.* [17]).

Em artigo muito influente publicado em 1966 intitulado *The economics of the coming Spaceship Earth*, o economista Kenneth Boulding constrói uma metáfora para discorrer sobre uma necessária mudança de orientação da humanidade para que seja possível atingir a sustentabilidade. Como será visto em mais detalhes no capítulo 5, a produção econômica depende de trocas com o meio ambiente no sentido de captar recursos e serviços ambientais e, finalmente, descartar seus resíduos. Em uma economia do *cowboy*, a fronteira do sistema econômico pode ser expandida indefinidamente, não havendo limites para a capacidade do ambiente em suprir a demanda por recursos, serviços, energia e descarte de resíduos. A perpetuação do crescimento estaria garantida pela expansão das fronteiras do sistema econômico. Neste caso, as medidas adequadas de sucesso da economia seriam aquelas relacionadas ao fluxo de materiais sendo processados ou transformados, assim como o PIB.

Segundo Boulding, contudo, uma mudança de percepção da economia é necessária no sentido de reconhecer o Planeta Terra como um sistema fechado para matéria e, portanto, apresentando limitações físicas para a produção econômica no longo prazo. Nesse sentido, o autor propõe a comparação do planeta com uma espaçonave, com reservas limitadas de todos os recursos necessários e com um fluxo de energia

constante porém limitado (energia solar). Assim, perseguir a sobrevivência no longo prazo implica que a produção econômica ingresse em um ciclo ecológico, no qual o fluxo de materiais e energia encontra-se em um nível baixo o suficiente para garantir a quantidade e qualidade do estoque de capital do planeta. Esta metáfora influenciou a consolidação de uma corrente de pensamento chamada economia ecológica (DALY [1]) e, de certa forma, antecipou o debate, hoje muito em pauta, a respeito dos impactos da produção econômica no meio ambiente. (Sobre este debate, aliás, na seção 2.1.1 são apresentados os paradigmas que norteiam a relação da economia com o meio ambiente).

Assim, DALY [1] afirma que existe um crescimento que pode ser considerado antieconômico, porque decorre do incremento na produção as custas da utilização de recursos e sacrifício de bem-estar que valeriam mais do que os itens produzidos. A figura 2.1 exibe esta conclusão: a utilidade aqui é uma *proxy* para o nível de bem-estar e a desutilidade corresponde aos sacrifícios necessários para aumentar a produção e o consumo. Estão incluídos nestes sacrifícios: o uso do trabalho, perda de lazer, depleção de recursos, exposição à poluição. A partir de um certo nível de produção e consumo, o crescimento passa a não ser desejável, quando a desutilidade excede a utilidade gerada pela produção. O crescimento passa a ser antieconômico.

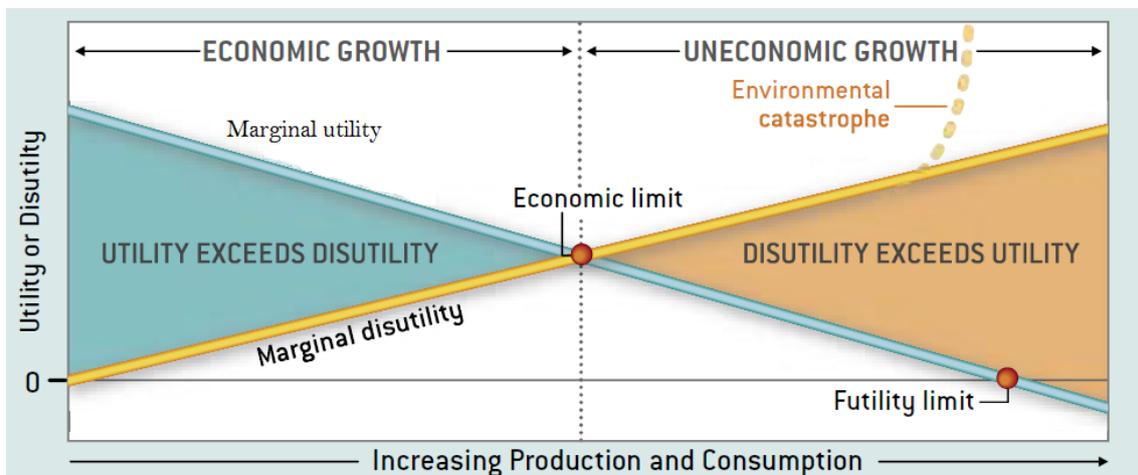


Figura 2.1: Quando o crescimento é ruim (fonte: DALY [1]).

Do ponto de vista dos rejeitos decorrentes da produção, a teoria desenvolvida no âmbito da economia da poluição afirma que existe um nível ótimo de poluição quando o benefício marginal da produção econômica se iguala ao custo externo extra provocado pela poluição para certo nível de produção, digamos Q . O embasamento teórico da economia da poluição é apresentado em detalhes na seção 5.4.1 desta dissertação.

Outro aspecto a respeito dos limites do crescimento econômico é a ameaça do

esgotamento de recursos naturais finitos. Em 2014, 81,2% da energia produzida no mundo foi proveniente de combustíveis fósseis, principalmente petróleo e seus derivados (IEA [18]). Segundo relatório da Agência Internacional de Energia (IEA), 31% da energia primária produzida no mundo em 2014 foi proveniente do petróleo e outros 21% do gás natural (IEA [18]). Ocorre que o petróleo é um recurso não renovável no sentido de que não há reposição ou crescimento em uma escala de tempo observável ao homem (a seção 5.2 desta dissertação abordará a teoria econômica que procura tecer considerações a respeito do nível ótimo de extração dos recursos não renováveis). Dessa maneira, a Agência Internacional de Energia estima que o pico de produção do petróleo deve ocorrer em 2020 (JACKSON [7]), a partir de quando a produção mundial deve ser declinante, já considerando o desenvolvimento tecnológico e a descoberta de novas reservas nesta previsão. Dinâmicas semelhantes podem ser traçadas para outros recursos não renováveis, de forma que passa a ser central a capacidade de gerar substitutos renováveis a estes recursos.

Se há limites para a produção econômica, tanto do ponto de vista da depleção de recursos quanto dos seus efeitos sobre o clima (ver seção 3.3), a busca pelo crescimento econômico não deveria ser abandonada? Neste caso, os países em desenvolvimento teriam que renunciar à busca dos níveis de renda e afluência observados nos países desenvolvidos? Na verdade, esta análise é realizada tendo em conta o agregado de produção mundial e, dadas as disparidades entre as economias dos países, uma solução mais otimizada seria o crescimento econômico nos países em desenvolvimento sendo compensado pela diminuição do consumo em países desenvolvidos (CHANG [19], JACKSON [7]).

CHANG [19] conceitua desenvolvimento econômico como o processo de crescimento baseado no aumento da capacidade de produção de uma economia, isto é, sua capacidade de organizar e transformar suas atividades produtivas. Ao passo que o crescimento econômico está associado à variação da quantidade total de bens e serviços produzidos em determinado período. A distinção entre desenvolvimento e crescimento econômico é importante porque, não raro, há exemplos de países que experimentam rápido crescimento econômico, muitas vezes baseado na exploração de recursos naturais não renováveis, sem contudo desenvolverem-se economicamente. Isto é, tal crescimento não transborda no sentido de permitir o desenvolvimento tecnológico e organizacional destes países. Há um crescimento quantitativo, mas não o desenvolvimento econômico que é qualitativo.

O desenvolvimento tecnológico é um fator chave porque, como será discutido no capítulo 5, ele aumenta as reservas de recursos naturais com a criação de novas técnicas de localização, extração e consumo mais eficientes, além de viabilizar a produção por meio de recursos substitutos, estando na raiz do processo de inovação tecnológica.

Por outro lado, menos crescimento econômico não precisa implicar necessariamente redução de bem-estar para a população (JACKSON [7]). Existem oportunidades de mudanças em modelos de negócios que sustentam o bem-estar com menor utilização de recursos, tais como a economia compartilhada, migração de produtos para serviços, comércio justo, logística reversa e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. O que alguns economistas afirmam é que uma economia sustentável deve parar de crescer, mas isso não quer dizer que deve deixar de se desenvolver porque não há razão para limitar o desenvolvimento qualitativo (DALY [1]).

Ademais, existe a possibilidade de aumento da eficiência na produção econômica em relação à utilização de materiais, energia e, mais especificamente, ao consumo de carbono. Este descasamento, marcado por um declínio relativo da intensidade ecológica por unidade de produção econômica, é decididamente afetado pelo desenvolvimento tecnológico e por modelos de negócios inovadores. No entanto, é bem evidente que a diminuição dos impactos da produção econômica no meio ambiente, em termos absolutos, é função, não somente da intensidade ecológica da produção, como do nível de consumo e do tamanho da população mundial. Nesse sentido, é importante notar que, segundo dados da ONU disponível no sítio eletrônico UNdata, a emissão anual de CO_2 *per capita* no mundo avançou de 4,6 toneladas métricas em 2006 para 5,0 em 2013. Isso quer dizer que, se ainda não há progresso na diminuição de emissão de carbono em termos relativos, por muito mais razão, o nível de emissão em termos absolutos tem crescido.

Seguindo o objetivo do presente trabalho em apresentar os esforços da inclusão do meio ambiente no processo decisório dos agentes econômicos, na seção seguinte serão expostos os principais paradigmas que norteiam a relação economia e meio ambiente.

2.1.1 Paradigmas: Economia x Meio Ambiente

Segundo FAUCHEUX e NOËL [20], os paradigmas que norteiam a relação economia e meio ambiente são:

1. Naturicista
2. Economicista
3. Conservacionista
4. Desenvolvimento Sustentável

No paradigma naturicista, há a primazia da natureza. As considerações éticas se estendem à toda natureza, pregando-se a preservação integral da biosfera. O homem deve se submeter, portanto, à ordem natural e a natureza tem valor intrínseco.

Já o paradigma economicista é marcado pela eficiência econômica e a aplicação irrestrita da análise custo-benefício, em um universo mecanicista de grandezas quantificáveis. É um paradigma antropocentrista, racionalista e otimista com a tecnologia e as possibilidades de substituição entre capital natural e reproduzível, a ponto de não enxergar limites para a exploração ecológica. Em geral, não há considerações éticas intra e inter-geracionais.

O paradigma conservacionista, por sua vez, apregoa a existência de limites ecológicos absolutos de forma que o crescimento econômico deveria parar e a economia deveria atingir um estágio de crescimento zero, o chamado estado estacionário. Há preocupação em conservar o capital natural com considerações éticas principalmente inter-geracionais. É um paradigma antropocentrista e utiliza as leis da termodinâmica para fundamentar sua visão do meio ambiente como um obstáculo ao crescimento econômico.

Finalmente, o paradigma do desenvolvimento sustentável não vê o meio ambiente como um obstáculo intransponível ao desenvolvimento econômico. Propõe a integração das esferas social, econômica e ambiental em suas análises, fazendo considerações éticas inter e intra-geracionais. Sob este paradigma, o crescimento econômico não é descartado, no entanto, propõe-se o estabelecimento de barreiras para a utilização dos recursos naturais, assim como propõe o emprego de instrumentos econômicos de incentivos adequados para atingir suas metas. A ideia aqui é adaptar o modelo de crescimento econômico para, no fim das contas, fazê-lo perdurar.

O capítulo 2 procurou introduzir o tema dos supostos limites à produção sob um ponto de vista econômico. Já o capítulo 3 seguinte apresenta alguns conceitos de ecologia que são de fundamentais para o entendimento da relação de complexidade do ambiente com a economia.

Capítulo 3

Ecosistemas e Impactos Antropogênicos

3.1 Um pouco de Ecologia

Neste capítulo apresentaremos alguns conceitos que fundamentam as ideias debatidas neste trabalho. Inicialmente, definamos:

1. Espécie: grupo de organismos similares cujos membros naturalmente cruzam entre si gerando descendentes férteis.
2. População: grupo de organismos da mesma espécie que vivem juntos em uma mesma área e durante um mesmo período. Indivíduos da mesma espécie ocorrem em populações.
3. Comunidade: associação natural que consiste em todas as populações de diferentes espécies que vivem e interagem em uma mesma área durante um período de tempo.
4. Ecossistema: conjunto composto por uma comunidade de organismos vivos e o ambiente abiótico (não-vivo, também chamado de ambiente físico) no qual estão inseridos. Através deste ambiente físico flui energia e circulam nutrientes e outros elementos químicos (BOTKIN e KELLER [21]).
5. Ecologia: estudo das interações entre diferentes organismos de uma comunidade e entre estes organismos e o ambiente abiótico em que eles vivem (BERG *et al.* [22]). Isto é, o objetivo fundamental da ecologia é entender o funcionamento dos ecossistemas.

De forma mais geral, um sistema é um conjunto de partes que funcionam como um todo, sendo possível definir de diferentes formas os limites para cada sistema,

dependendo do objetivo a ser estudado. Dessa maneira, o corpo humano pode ser entendido como um sistema, assim como, em uma escala bem maior, todo o Planeta Terra pode ser considerado um sistema (BOTKIN e KELLER [21]).

Estabelecido o limite do sistema sob investigação, podemos descrevê-lo a partir de suas características. Um sistema pode ser aberto, com entradas e saídas de energia e matéria, ou fechado, quando não há trocas de energia ou matéria com o meio externo. Não é difícil observar que, de forma geral, os diversos ecossistemas da Terra são sistemas abertos. A Floresta Amazônica é um ecossistema aberto na medida em que há, por exemplo, fluxo de energia solar e troca de água com o oceano e com a atmosfera, além do fluxo de uma miríade de elementos químicos para dentro e para fora da floresta¹. Para efeitos práticos, o Planeta Terra como um todo é um sistema materialmente fechado e energeticamente aberto, no qual não há troca relevante de matéria com o meio externo mas há a entrada contínua de energia solar, da qual, em última escala, dependem todos os seres vivos.

A medida que os ecossistemas do nosso Planeta são mais estudados cientificamente, fica mais evidente que estes apresentam um aspecto dinâmico, no qual as características do sistema se alteram ao longo do tempo, distanciando-se do que seria um sistema estático com condições fixas (BOTKIN e KELLER [21]). Na verdade, as mudanças nos ecossistemas podem ocorrer de forma natural - algumas em larga escala como enchentes, incêndios e terremotos - ou podem ser resultados da intervenção do homem. No entanto, é notável que os ecossistemas, de forma geral, tenham uma resiliência determinada, muitas vezes, por mecanismos de *feedback*, quando as saídas do sistema afetam suas entradas gerando uma espécie de auto-regulação. Os ecossistemas são entendidos modernamente, pois, como sistemas em constante mudança, porém, em equilíbrio dinâmico, dadas suas capacidades de auto-regulação, resiliência e recuperação.

O estudo dos ecossistemas, em última análise, procura identificar a relação entre seus componentes e o funcionamento de seus processos (ODUM [23]). A grosso modo, a estrutura do ecossistema é composta de duas grandes partes: organismos vivos e ambiente abiótico. Enquanto que, do ponto de vista dos processos do ecossistema, temos o ciclo de elementos químicos e o fluxo de energia (BOTKIN e KELLER [21]).

A fim de modelar e analisar os ecossistemas é conveniente subdividi-los em seis estruturas de componentes do sistema e seis processos fundamentais como relacionados a seguir. Ainda que esta divisão seja arbitrária, é conveniente para facilitar o entendimento uma vez que a primeira foca na estrutura e a segunda no funcionamento do ecossistema (ODUM [23]).

¹No capítulo 4 são tecidos mais detalhes a respeito da conceituação do ambiente como uma sistema complexo.

1. Componentes ou estrutura do ecossistema

- (a) Substâncias inorgânicas presentes nos ciclos de matéria tais como Nitrogênio (N), Oxigênio (O), água (H_2O), entre outras.
- (b) Compostos orgânicos tais como proteínas, carboidratos, lipídios, entre outros.
- (c) Condições climáticas como regime de chuvas, temperatura, umidade, entre outras.
- (d) Autótrofos ou produtores são espécies, tais como plantas e algas, capazes de sintetizar seu próprio alimento a partir de substâncias simples e da fixação do gás carbônico.
- (e) Heterótrofos fagotróficos ou macro-consumidores são as espécies que não são capazes de sintetizar seu próprio alimento, alimentando-se, portanto, de outras espécies e compostos inorgânicos. De forma geral, são os grandes animais.
- (f) Heterótrofos saprozóicos ou micro-consumidores são as espécies, tais como bactérias, fungos e alguns protozoários, que quebram compostos complexos, absorvem alguns dos produtos desta decomposição e liberam substâncias inorgânicas utilizadas pelos autótrofos, além de outros resíduos orgânicos que podem corresponder a fontes de energia ou podem ser inibidores, estimuladores ou reguladores de outros componentes bióticos do ecossistema.

2. Processos do ecossistema

- (a) Fluxo de energia.
- (b) Cadeia alimentar com as respectivas relações tróficas entre as espécies do ecossistema, descrevendo quais espécies servem de alimentos umas para as outras.
- (c) Padrões de diversidade no espaço e no tempo.
- (d) Ciclo de nutrientes.
- (e) Desenvolvimento e evolução.
- (f) Controle.

A subdivisão dos ecossistemas em componentes e processos como acima reforça a característica cíclica de seus processos, os quais são realizados por diferentes componentes. Por exemplo, os autótrofos tem um papel fundamental ao servir de fonte de energia química para os macro-consumidores, produzindo seu próprio

alimento a partir da fixação do gás carbônico, de substâncias inorgânicas e da luz solar em um processo chamado fotossíntese. Na outra ponta da cadeia alimentar, os micro-consumidores cumprem seu papel quebrando compostos complexos e liberando substâncias inorgânicas que serão utilizadas pelos autótrofos para a produção de seu alimento. Este conjunto, com a inserção dos heterótrofos fagotróficos, compõe a cadeia alimentar e é responsável pelo fluxo de energia e ciclo de nutrientes, por exemplo.

3.2 Ecossistemas: Sistema de Suporte à Vida

Todos os componentes e processos descritos são necessários para o suporte à vida, no entanto, nenhuma espécie em particular perfaz, sozinha, todo o ciclo de elementos químicos e fluxo de energia. Assim é que, a vida na Terra depende das características dos ecossistemas e não de indivíduos ou populações isoladas (BOTKIN e KELLER [21]). E, o equilíbrio dos ecossistemas que dão suporte à vida depende da interação complexa entre seus componentes e processos. O gerenciamento da população humana, dos recursos naturais e o sistema de suporte à vida como uma unidade integrada é o maior desafio já enfrentado pela humanidade (ODUM [23]).

Ao suportar a vida em nosso Planeta, os ecossistemas fornecem serviços à humanidade e estão diretamente vinculados ao bem-estar humano. Os serviços dos ecossistemas podem ser divididos nas seguintes categorias, conforme proposto em MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT [24].

- **Serviços de Provisão:** produtos obtidos diretamente dos ecossistemas tais como alimentos, água, madeira, fibras, minérios, combustíveis, recursos genéticos utilizados na produção animal, agrícola e em biotecnologia, elementos bioquímicos que compõem, por exemplo, remédios e aditivos alimentares.
- **Serviços de Regulação:** benefícios obtidos da regulação de processos do ecossistema tais como controle do clima localmente e globalmente, purificação da água e assimilação de resíduos, regulação da qualidade do ar, controle de erosão, polinização, controle de doenças, pragas e controle de desastres naturais.
- **Serviços Culturais:** benefícios intangíveis obtidos dos ecossistemas de fundos diversos tais como religioso, cultural, social, estético, educacional, recreacional e paisagístico.
- **Serviços de Suporte:** serviços necessários para a produção de todos os outros serviços do ecossistema, embora não sejam usados diretamente pelas pessoas, tais como ciclo de aproximadamente 20 nutrientes essenciais para a

vida, formação do solo, fotossíntese com liberação de oxigênio e fixação de gás carbônico, ciclo da água e produção primária que corresponde a acumulação de energia e nutrientes pelos organismos presentes no ecossistema.

Os serviços dos ecossistemas influenciam o bem-estar humano nos seus constituintes relacionados à segurança pessoal, ao acesso a recursos, à mitigação de riscos de desastres naturais como enchentes e incêndios, ao acesso a materiais básicos para uma boa vida como alimentos, água, abrigo, roupas, ao acesso à água e ar limpos, à saúde e a relações sociais adequadas como respeito mútuo e possibilidade de ajudar os outros. Contudo, o estudo MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT [24] publicado em 2005, redigido sob demanda da ONU com a contribuição de 1.300 pesquisadores, constatou que aproximadamente 60% (15 de 24) dos ecossistemas avaliados estavam sendo degradados ou utilizados de forma não sustentável. O custo total da degradação dos serviços prestados por um ecossistema é muito difícil de medir, afirma o estudo, embora as evidências demonstrassem que eles eram relevantes e crescentes.

3.3 Impactos Antropogênicos

Há uma incerteza considerável sobre quanto os diferentes ecossistemas podem ser utilizados até alcançarem seus pontos de inflexão, a partir dos quais suas capacidades em prover serviços reduzem drasticamente (TEEB [4]). Diante desta incerteza, que dificulta a comprovação científica e experimental de tais pontos de inflexão, e da relevância dos serviços prestados pelos ecossistemas para o suporte à vida, é que surgem as discussões a respeito do chamado *princípio da precaução*. O princípio da precaução, o qual surgiu na Alemanha em fins da década de 1960 como um conjunto de prescrições sobre como gerir os riscos decorrentes da indústria química, é definido como a garantia contra riscos potenciais que, de acordo com o estado atual do conhecimento, não podem ainda ser identificados (DUPAS [15]). Na ausência da certeza científica, a possibilidade de um dano irreversível deve motivar medidas para mitigação do risco de utilização dos ecossistemas além de suas capacidades de suporte, de acordo com o princípio da precaução.

Não obstante, a ecologia confirma a crucialidade dos serviços prestados pelos ecossistemas, de forma que, a degradação ou extinção de um ecossistema dá lugar a um conjunto de impactos que podem ser globais, muito além de locais (BOTKIN e KELLER [21]). Em uma perspectiva histórica do desenvolvimento da espécie humana, o que há de novidade em nosso tempo é a grande escala com que nosso modo de vida consome os serviços provenientes do ecossistema (DALY [25]), havendo evidências de que este consumo muitas vezes ocorre a uma taxa maior do que os

ecossistemas podem fornecê-los. Essa escala é afetada por diversos fatores como, por exemplo, o tamanho expressivo da população mundial (mais de 7 bilhões de pessoas), a ocupação do espaço com a população cada vez mais concentrada em zonas urbanas, a crescente produção econômica baseada principalmente na exploração de recursos naturais finitos com posterior descarte de resíduos ao ambiente, assim como fatores sociopolíticos relacionados à governança e estrutura legal (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT [24]). Dessa maneira, esta trajetória faz com que muitos ecologistas questionem se já ultrapassamos a capacidade de suporte da terra, definida como o número máximo de indivíduos de nossa espécie que podem ter suas necessidades supridas sem comprometer a capacidade da Terra de suprir as necessidades deste mesmo número de indivíduos no futuro (BOTKIN e KELLER [21]). Não há um consenso científico a respeito de qual seria a capacidade de suporte da Terra embora sejamos capazes de identificar alguns dos fatores que contribuem para a utilização não sustentável dos ecossistemas, como os descritos acima.

Ademais, a ciência já concluiu que a ação humana tem contribuído decididamente para alterações significativas no ecossistema da Terra (HINRICHS e KLEINBACH [26]). De todos os impactos da ação humana, talvez aquele que possui repercussões mais transversais é o processo de elevação da temperatura média da Terra - o chamado aquecimento global. Atualmente, o principal debate na comunidade científica não é se o aquecimento global acontecerá, mas a que taxa, com que efeitos e, mais importante, o que pode ser feito para mitigar este risco (BERG *et al.* [22]). A esse respeito, podemos citar o Painel Intergovernamental de Mudança Climática estabelecido pela ONU, na sigla em inglês IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), que é um trabalho cooperativo com a contribuição de centenas de especialistas do mundo todo sobre estudos do clima com o intuito de fornecer uma avaliação das informações científicas, técnicas e sócio-econômicas produzidas mundialmente sobre a tema mudança climática. A conclusão de seu estudo mais recente aponta que o aquecimento global é inequívoco e que algumas das mudanças observadas desde 1950 assumem magnitudes sem precedentes no último milênio, considerando um período transcorrido de apenas algumas décadas. Assim, a atmosfera e os oceanos aqueceram, a quantidade de neve e gelo diminuiu², o nível do mar se elevou e aumentou a concentração de gases na atmosfera que propiciam o aquecimento global (IPCC [28]). A previsão é de que, até o ano de 2100, deve haver cada vez mais dias quentes e menos dias frios, aumento ainda maior do nível dos oceanos e, muito provavelmente, maior incidência de tempestades e ciclones em algumas áreas e secas em outras (IPCC [28]).

²Para uma análise detalhada sobre a evolução da quantidade de gelo presente no planeta, ver POLLACK [27]. Nesta obra, o autor, que é um colaborador do IPCC, também conclui que a quantidade de gelo diminuiu significativamente nas últimas décadas por conta do aquecimento global.

Como vimos, em última análise o fluxo de energia proveniente do sol é responsável pela manutenção dos processos dos ecossistemas na Terra e, conseqüentemente, por servir de fonte de energia para quase todas as espécies do Planeta. Além, a energia solar aquece a Terra. De toda energia solar que atinge a Terra (por volta de 1366 watts/m²), cerca de 69% são absorvidos pela atmosfera, terra e água do Planeta, com os outros 31% sendo refletidos pelas partículas da atmosfera, pelas nuvens, pelo gelo, neve e pela superfície terrestre (BERG *et al.* [22]). O aquecimento global é causado pelo acúmulo na atmosfera de gases como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido de nitrogênio (N_2O) e ozônio (O_3), que propiciam o efeito estufa. Na verdade, a concentração de (CO_2) na atmosfera aumentou 40% desde antes da revolução industrial, principalmente pela emissão na utilização de combustíveis fósseis, tais como petróleo, carvão e gás natural, atingindo a concentração de 391 ppm (partes por milhão) em 2011 (IPCC [28]). As concentrações de metano e óxido de nitrogênio aumentaram em 150% e 20%, respectivamente, no mesmo período (IPCC [28]). Ocorre que estes gases absorvem a radiação infravermelha refletida pela Terra, diminuindo o fluxo de radiação refletida para o espaço, isto é, contendo o calor, aquecendo a atmosfera e, finalmente, gerando o fenômeno conhecido como efeito estufa (BERG *et al.* [22]).

LOVELOCK [29] destaca ainda o efeito *feedback* positivo decorrente do aquecimento global e da diminuição do gelo, já que o gelo branco coberto de neve reflete cerca de 80% da luz solar ao espaço, enquanto que a água escura do mar reflete apenas cerca de 20%. Nesse sentido, menor cobertura de gelo dá um novo impulso ao aquecimento global. Finalmente, nota-se que, por conta do calor latente, a quantidade de energia necessária para descongelar certo volume de gelo é muito maior do que a necessária para o aquecimento desse mesmo volume de água em estado líquido. Esta condição, pode levar ao aumento progressivo da temperatura dos oceanos à medida que o gelo flutuante derrete. O aumento da temperatura dos oceanos, por sua vez, possui impactos absolutamente transversais sobre os ecossistemas marinhos, como por exemplo, tornar mais difícil que os nutrientes presentes nas águas frias e profundas sejam disponibilizados em águas mais quentes e superficiais. Em tempo, LOVELOCK [29] é muito mais pessimista que o IPCC em relação ao ritmo do aquecimento global.

O aumento da concentração de CO_2 na atmosfera possui, contudo, outro impacto igualmente transversal que é o declínio da alcalinidade dos oceanos (KOLBERT [30]). Cerca de dois terços da superfície do Planeta Terra são cobertos por água. Os oceanos absorvem grande quantidade de CO_2 presente na atmosfera, o que os torna mais ácidos na medida em que aumenta a concentração do ácido carbônico na água ($CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$) (BOTKIN e KELLER [21]). As águas dos oceanos são naturalmente alcalinas, com *pH* em torno de 8. Ocorre que o aumento

de concentração do ácido carbônico, diminui o pH dos oceanos e reduz os íons de carbonato disponíveis na água, dos quais fazem uso animais calcificadores tais como ouriços e estrelas-do-mar, mariscos, ostras, corais, moluscos, fitoplânctons e zooplânctons (BERG *et al.* [22]). Como estes animais estão na base da cadeia alimentar marinha, a diminuição de sua população tem impacto em toda a cadeia alimentar dos oceanos, diminuindo a biodiversidade marinha.

Destaca-se ainda que o aquecimento global ocasiona não somente a perda da biodiversidade marinha, como relatado acima, mas também ocasiona a extinção, por exemplo, de espécies terrestres (KOLBERT [30]), na medida em que as mudanças climáticas dificultam a sobrevivência de espécies que são perfeitamente adaptadas a habitats específicos. A biosfera do Planeta Terra se estende por uma faixa de apenas 1 quilômetro de espessura (WILSON [9]). E a vida, da forma como se desenvolveu, exige condições igualmente específicas. Dessa maneira, as espécies que têm seus habitats ameaçados têm poucas opções além de migrar e/ou adaptar-se. Nesse processo, muitas espécies ou são extintas ou estão sob risco de extinção, com o número de indivíduos abaixo da linha de risco.

Outro impacto decorrente do aumento da temperatura média da Terra diz respeito à potencial alteração de uma grande corrente oceânica chamada cinturão termohalino mundial³. Termohalino no sentido de que esta corrente é gerada por diferenças na temperatura e na salinidade da água, bem como por ventos que induzem correntes na superfície marinha. O cinturão termohalino mundial é caracterizado por um fluxo intenso de águas quentes superficiais em direção ao Atlântico Norte e, por conta de seu volume - 20 milhões de m^3/seg é o fluxo estimado de água, que afunda quando salgada e fria e emerge quando aquecida - e extensão - circunda o globo do Atlântico Norte à Antártica e, então, para o Pacífico Norte - é associada à manutenção do clima mais ameno e menos frio na Europa, por exemplo (BOTKIN e KELLER [21]). As correntes oceânicas têm oscilações naturais decorrentes de mudanças de condições climáticas tais como temperatura e pressão do ar e, com isso, impactam o clima em períodos subsequentes (BOTKIN e KELLER [21]). Modelos baseados no comportamento passado do cinturão termohalino sugerem que o aquecimento global pode enfraquecer ou mesmo parar esta corrente marítima, trazendo impactos diversos no clima mundial (BERG *et al.* [22]).

Ademais, o aquecimento global ocasiona o aumento do nível dos oceanos que coloca em risco o território de diversas cidades litorâneas com potencial para deslocar imenso número de habitantes no mundo todo, podendo até mesmo fazer desaparecer países insulares. Segundo IPCC [28], o aumento do nível do oceano no período de 1901 a 2010 foi de 0,19 metros (de 0,17 a 0,21 metros), ocorrendo em ritmo de elevação cada vez mais rápido. Para LOVELOCK [29] a melhor medida disponível

³O termo, em inglês, é *ocean conveyor belt*.

para estimar o aquecimento global é a elevação do nível do mar, que é ocasionada apenas pelo derretimento das geleiras e pela expansão do mar com o aquecimento. Diferentemente da temperatura, que flutua ano a ano, o nível do mar aumenta progressivamente.

Finalmente, o objetivo desta pequena incursão sobre os impactos antropogênicos no Planeta é, em última análise, demonstrar sua transversalidade. O sistema composto pelo meio ambiente é de tal forma interligado, congregando diversas variáveis, apresentando uma esplêndida capacidade de auto-organização, que possui características do que se chama um sistema complexo. Dessa maneira, o capítulo 4 a seguir irá descrever as características de um sistema complexo com o objetivo de conceituar o ambiente como tal.

Capítulo 4

O Meio Ambiente como um Sistema Complexo

A visão cartesiana da ciência remonta ao filósofo francês René Descartes que viveu entre 1596 e 1650. Descartes reuniu a tendência filosófica de seu tempo de preocupação com a matemática à importância do método para inaugurar um sistema filosófico e ser considerado o fundador da filosofia moderna (RUSSEL [31]). Descartes elaborou seu método que continha quatro regras com o objetivo de permiti-lo fazer melhor uso da razão: desconfiar de tudo e não assumir ideias preconcebidas, a não ser as claras e evidentes; estabelecer um ordem de complexidade para os pensamentos do simples para o complexo; verificar tudo cuidadosamente a fim de que nada seja negligenciado e, finalmente, dividir o problema em quantas partes menores e mais simples forem necessárias para a sua resolução.

O pensamento científico foi muito influenciado pela ideia de divisão da realidade em unidades fundamentais em prol do entendimento geral, o chamado analitismo - o todo deve se explicar integralmente por suas partes. Foi igualmente influenciado pelo reducionismo segundo o qual o todo se reduz à soma de suas partes. De forma que o conhecimento foi paulatinamente segregado em diversas especialidades, permitindo o avanço nos vários ramos da ciência. Da mecânica à química e à matemática, o conhecimento e a ciência passaram a ser cada vez mais compartimentados, com avanços marcantes em praticamente todos os ramos.

Mas se a análise empreendida pela ciência é cada vez mais aplicada sobre unidades menores, é de se esperar um esforço de reagrupamento ou síntese para que, com a noção do todo, seja possível explicar a realidade. Nesse ponto é que a visão do universo como um relógio, uma máquina previsível e perfeita, falha em sua tentativa de descrever sistemas complexos da natureza. Isso acontece porque a natureza parece não seguir uma trajetória única e pré-determinada, há um grande número de variáveis em jogo manifestando propriedades que não parecem ser consequência de seus elementos vistos isoladamente. Deste processo de síntese é que surgem concei-

tos como o holismo, que corresponde à procura da compreensão dos fenômenos na sua totalidade, e a complexidade, que aqui pode ser entendida como um esforço para descrição de sistemas que apresentam características similares a de um ecossistema, por exemplo, a serem detalhadas adiante. Assim, o objetivo deste capítulo é apresentar as principais características de um sistema complexo para, enfim, conceituar o meio ambiente como tal.

4.1 Complexidade: O que é?

Não há consenso sobre a definição de complexidade, havendo diferentes teses consideradas muito díspares entre si (PRADO [32]). Para MORIN [33], a complexidade é um tecido de constituintes heterogêneas que não podem ser dissociadas, um todo formado de elementos distintos, inclusive incertezas, ambiguidades e desordem. Assim, com a ideia de um sistema complexo, há uma unidade elementar, mas é uma unidade complexa, um “todo” que não se reduz à “soma” de suas partes.

Como citado anteriormente, o paradigma da ciência moderna foi marcado pelo reducionismo e o analitismo, o que se contrapõe a tentativa da complexidade de considerar o todo. Nesse sentido, para MORIN [33], o paradigma simplificador, ao qual a ciência recorre, põe ordem ao universo e expulsa a desordem, ou separando o que está ligado ou unificando o que é diverso. Assim, é preciso saber distinguir as unidades constituintes, mas não isolar, uma vez que todas elas são interligadas por uma relação bidirecional: elas causam e são causadas.

Ao passo que a ciência atual busca afastar as incertezas, eliminar a imprecisão, a ambiguidade e a contradição, a complexidade demanda a aceitação de certa imprecisão tanto nos fenômenos observados quanto nos conceitos trabalhados (MORIN [33]). Ao longo do século XX, foram empreendidas diversas pesquisas em campos diferentes do conhecimento que se depararam com a natureza complexa dos fenômenos sob investigação. Do princípio da incerteza da mecânica quântica à sensibilidade às condições iniciais dos sistemas caóticos, a complexidade dos fenômenos da natureza passou a ser reconhecida. E, com isso, o paradigma da complexidade ganhou terreno na tentativa de explicar as manifestações complexas da realidade.

Com vistas a abordar o conceito de complexidade, MORIN [33] define três princípios norteadores. São eles:

1. Dialógico: elementos complementares e antagônicos. É o paradoxo ordem e desordem. A ordem suprime a desordem e vice versa, mas ao mesmo tempo, por vezes, elas colaboram e produzem organização e complexidade. Um exemplo são os organismos vivos que são gerados a partir da possibilidade de reprodução de compostos orgânicos estáveis (DNA), os quais carregam informações hereditárias para a formação de proteínas. Estas proteínas compõem os organismos

e se degradam incessantemente, porém também são reconstituídas continuamente.

2. Recursão organizacional: processo recursivo é aquele em que os produtos e os efeitos são ao mesmo tempo causas e produtores do que os produz. Traz uma ruptura com a ideia linear de causa e efeito. Este princípio está relacionado com a ideia de auto-organização observada em organismos vivos, assim como com o conceito de *feedback* presente nos estudos dos ecossistemas.
3. Hologramático: A parte está no todo assim como o todo está na parte. O princípio hologramático está presente no mundo biológico porque, por exemplo, cada célula de um organismo possui a totalidade da informação genética deste organismo.

Finalmente, com base na bibliografia consultada, podemos considerar complexidade como um paradigma de pensamento que procura analisar os fenômenos de um ponto de vista holístico, contrapondo-se ao analitismo, ao reducionismo e à causalidade linear. Em complexidade, não se assume a existência de leis gerais e fixas que regem os elementos constituintes de um sistema e, sim, que seus elementos interagem entre eles e com o meio externo (sistema aberto) em um processo recursivo em que são ao mesmo tempo causa e efeito dos fenômenos observados. Assim, a realidade está tanto no elo quanto na distinção entre o sistema aberto e seu meio ambiente (MORIN [33]).

Outra característica marcante de um sistema complexo é que suas leis de organização são de desequilíbrio, conduzindo muitas vezes a um dinamismo estável. Nesse ponto, é bastante pertinente a comparação que teria sido proposta por Von Neumann entre máquina artefato e máquina viva (MORIN [33]). A máquina artefato é organizada e constituída de elementos confiáveis, tais como um motor de um carro, onde cada uma de suas peças é fabricada com materiais de grande qualidade e confiabilidade. A máquina artefato, no entanto, possui muito menos confiabilidade do que seus elementos isoladamente, tendo em vista que basta a degradação ou falha de um dos seus elementos para que o motor não funcione.

No caso da máquina viva, seus componentes são muito menos confiáveis, degradando-se continuamente como as células em nosso corpo, por exemplo. Contudo, a capacidade de auto-organização ou renovação faz com que o conjunto da máquina viva seja muito mais confiável, no sentido de que grande parte das células de um organismo podem morrer e ser substituídas e, ainda assim, o organismo vivo se perpetua. Ainda que a máquina viva não seja autossuficiente (sua individualidade e autonomia organizacional dependem do meio), ela tem a capacidade de auto-organização. Nesse sentido, o motor de um carro é um exemplo de sistema

complicado, enquanto que um organismo vivo, por menor que seja como um pequeno inseto, corresponde a um sistema complexo.

4.2 Conceituando o Meio Ambiente como um Sistema Complexo

Até aqui, ficou evidenciado como a característica de auto-organização é um aspecto importante de um sistema complexo. Uma vertente para definição de sistemas complexos aponta que eles são um campo interdisciplinar de pesquisa que objetiva explicar como um número muito grande de componentes individuais se organizam de forma descentralizada, sem a necessidade de um controle central, em um conjunto que cria padrões, usa informações, evolui e até mesmo aprende (MITCHELL [34]).

Assim, a teoria da complexidade parte do princípio de que estes sistemas têm propriedades importantes em comum (MITCHELL [34]):

1. Possuem um número muito elevado de participantes, cada um deles seguindo regras de comportamento simples e de forma descentralizada que acabam por gerar comportamentos coletivos complexos. Um exemplo bastante evidente desta propriedade é uma colônia de formigas que seguem regras simples para procurar comida, reagir a sinais químicos deixados por outras formigas e combater invasores, por exemplo. No entanto, as formigas são capazes de expressar um comportamento coletivo complexo do qual são exemplos a construção do formigueiro e de pontes para explorar novas áreas.
2. Não são sistemas em equilíbrio estático, sendo adaptáveis e experimentando mudanças constantes em resposta a estímulos ambientais e aos seus processos de desenvolvimento. Isso quer dizer que um sistema complexo interage com o meio externo produzindo e usando informação do meio ambiente.
3. Em decorrência da interação com o ambiente, são capazes de se adaptar, alterar o seu comportamento no sentido de aumentar as suas chances de sucesso por meio de aprendizado ou processo evolucionário.

A ciência da complexidade busca, portanto, explorar as propriedades gerais dos sistemas complexos, investigando a emergência dos processos de adaptação, auto-organização e de não-equilíbrio decorrentes de comportamentos individuais dos componentes simples do sistema. Para tanto, são utilizados métodos indutivos e empíricos, em geral, com o auxílio de simulações no computador, sem o qual seria muito difícil captar a miríade de comportamentos possíveis dos componentes do sistema em resposta a diferentes estímulos com intensidades e escalas variadas.

Com se pode depreender das definições de complexidade e de sistema complexo apresentadas acima, o meio ambiente é um clássico exemplo de complexidade. Isso porque, na natureza há um sem fim de exemplos de sistemas complexos: desde a interação química das proteínas nas células à evolução das espécies, da engenhosa organização de colônias de insetos aos sistemas imunológicos, todos estes exemplos são complexos. Há estudiosos que consideram o Planeta Terra, com tudo o que ele contém, como um sistema fisiológico único, uma entidade que é viva (LOVELOCK [29]) e, portanto, complexa.

Ao conceituar o meio ambiente como um sistema complexo, o objetivo deste capítulo 4 está atingido. As características da complexidade aqui discutidas reforçam o entendimento dos ecossistemas mundiais como o sistema de suporte à vida em nosso planeta, como explicado no capítulo 3. Esta noção é importante para fundamentar a valoração dos serviços ambientais, que será detalhada no capítulo 6. Finalmente, também fundamenta a necessidade de inclusão do meio ambiente na teoria econômica e abre caminho para que se entenda a economia como um subsistema do meio ambiente, o que será discutido no próximo capítulo. Agora é hora de verificar o que foi produzido na teoria econômica, no âmbito da economia do meio ambiente e da economia da poluição, com vistas a incluir o meio ambiente em seu arcabouço.

Capítulo 5

Economia dos Recursos Naturais e da Poluição

5.1 Fundamentos da Economia do Meio Ambiente

5.1.1 Métodos em Economia

Segundo o economista Ronald Coase, a economia é o estudo da atuação das instituições sociais que unem o sistema econômico: firmas, mercados de bens e serviços, mercado de trabalho, mercado de capitais, sistema bancário, comércio internacional, e assim por diante (SHIRLEY *et al.* [35]). Esta é uma definição que enfatiza o objeto de estudo desta ciência, também conhecida por ciência lúgubre, que tem estado no centro dos debates no últimos anos em que o mundo enfrentou a crise econômica, deflagrada por uma bolha nos preços de ativos no mercado imobiliário norte-americano, mas que assumiu proporções mundiais diante do espalhamento de derivativos lastreados em empréstimos imobiliários, em uma intrincada rede de investimentos.

A transversalidade e as amplas consequências dos aspectos econômicos, as quais conferem mais dramaticidade aos erros e acertos das estratégias econômicas praticadas por um país, são as molas motivacionais do presente trabalho. Segundo alguns economistas, desde que os homens decidimos por bem fixar raízes, viver em sociedade, intercambiar bens, acreditar nas moedas e - por que não? - confiar que o mercado em sua ordem espontânea, guiado por uma mão invisível, disponibilizaria os bens dos quais necessitamos, é que todos possuímos uma vertente econômica, um aspecto de nosso comportamento a que se convencionou chamar *homo economicus*. Isto se reflete na premissa, assumida por muitos modelos econômicos, segundo a qual as pessoas tomam decisões de maneira racional e essencialmente egoísta, procurando maximizar sua satisfação (utilidade) com o menor esforço (custo) possível. Deste comportamento individual, contudo, decorreriam mercados ordenados e estáveis.

Esta ideia foi originalmente apresentada por Adam Smith em seu livro *A riqueza das Nações*, de 1776, que alegadamente está na origem da disciplina então chamada economia política.

A economia não é caracterizada por ser uma ciência estritamente exata. Aqui é conveniente fazer duas distinções importantes a respeito da economia. Primeiramente, a economia não é como ciências naturais, como a física e a química, em que há elevado grau de consenso entre os cientistas. Um dos problemas relacionados com a economia é que ela está necessariamente centrada na política, mais do que na descoberta de leis fundamentais (SHILLER [36]). Há diversas teorias econômicas cada uma enfatizando diferentes aspectos de uma realidade complexa, fazendo juízos de valor moral e políticos variados e chegando, muitas vezes, a conclusões distintas (CHANG [19]). O segundo ponto a ser destacado é a dificuldade do teste empírico em economia. De forma geral, há limitações na promoção de experimentos para validar teorias, assim, o processo de construção de consensos em economia muitas vezes é alcançado recorrendo-se a uma análise histórica.

Contudo, mesmo tendo em vista os diversos enfoques das diferentes escolas de pensamento econômico, o aspecto político dos julgamentos em economia e a dificuldade do teste empírico, a teoria econômica construiu inegáveis avanços em campos distintos tais como finanças, política monetária, mercado de capitais, precificação de ativos, teoria dos jogos, comércio internacional, entre outros campos. Não obstante, o principal problema teórico enfrentado pela economia é a escolha do método ou abordagem de investigação (BRESSER-PEREIRA [37]). Bresser-Pereira toma emprestado uma consagrada classificação para propor a distinção das ciências em dois tipos: as ciências metodológicas - tais como a matemática, a estatística, a econometria e a teoria dos jogos -, as quais são instrumentais para o raciocínio do segundo grupo, as ciências substantivas, que possuem um objeto de estudo, como a física, a biologia, a economia e a sociologia.

O autor prossegue para discutir a aplicação em economia de dois métodos distintos de abordagem: o método histórico-dedutivo e o método hipotético-dedutivo. O método histórico-dedutivo, que segundo BRESSER-PEREIRA [37] foi essencialmente utilizado por economistas clássicos como Smith, Malthus e Marx, baseia-se na observação de uma realidade complexa e em mudança e, a partir desta observação histórica, procura generalizar, deduzindo e desenvolvendo hipóteses baseadas nestas observações. (Após o que, objetiva testar estas hipóteses, quando possível, com a utilização de ferramentas indutivas da econometria). Já o método hipotético-dedutivo parte de premissas, tais como o *homo economicus*, a racionalidade ilimitada, informação perfeita, retornos decrescentes, preferências estáveis e a crença de que os mercados conduzem ao equilíbrio, para fundamentar hipóteses e discorrer sobre fatos econômicos. O método hipotético-dedutivo possibilita uma teoria explicitada em

termos matemáticos, sendo o modelo deduzido logicamente a partir das premissas assumidas.

Em economia, tendo em vista o próprio objetivo da disciplina, não se deve perder o contato com a realidade e a qualidade da teoria proposta deveria estar relacionada com a sua capacidade de bem descrevê-la. BRESSER-PEREIRA [37] afirma que, por ser um ciência substantiva que visa a explicar e prever sistemas econômicos complexos, a economia deveria se valer prioritariamente do modelo histórico-dedutivo, ainda que ambos métodos sejam utilizados pelos economistas. Para as ciências metodológicas, no entanto, o método hipotético-dedutivo é mais adequado uma vez que o seu critério de verdade é apenas a consistência lógica (BRESSER-PEREIRA [37]).

Ocorre que a escola de pensamento em economia dominante atualmente, a escola neoclássica, faz uso principalmente do método hipotético-dedutivo. Para a edificação de sua teoria do equilíbrio geral, por exemplo, faz uso de hipóteses simplificadoras da realidade como as apontadas acima, frequentemente consideradas excessivamente simplificadoras (NELSON e WINTER [38]). Ao considerar a desejável capacidade da teoria econômica em explicar a realidade, da forma mais fidedigna possível, é que se levantam dúvidas a respeito da adequação de tais pressupostos e da capacidade desta teoria neoclássica em lidar, por exemplo, com a incerteza, com a racionalidade limitada, com a presença de grandes corporações, com a assimetria de informações, com os custos de transação, com mercados que não se conduzem para o equilíbrio, com a mudança histórica, com os limites biofísicos da produção econômica, enfim, com a complexidade das instituições econômicas reais. De fato, a despeito dos avanços conquistados pela teoria econômica, ainda existem diversas lacunas da realidade negligenciadas pela ortodoxia econômica, como por exemplo a explicação da persistente diferença de renda entre países, a pobreza, a fome, as crises econômicas, energéticas, a poluição e o esgotamento dos recursos naturais.

Para além da discussão a respeito dos métodos empregados na abordagem científica, entre as críticas mais contundentes feitas à teoria econômica figuram aquelas relacionadas à viabilidade ecológica de longo prazo do sistema capitalista frente à não consideração dos limites ecológicos do planeta na edificação da teoria econômica (DALY [25]). Em geral, os modelos econômicos são constituídos como sistemas fechados, isolados do meio externo. Sendo esta uma deficiência da teoria, já que os impactos decorrentes da atividade econômica no processo de aceleração da temperatura média do planeta são cada vez mais reconhecidos. Adicionalmente, ainda há a constatação de que parte dos recursos naturais necessários para a produção de bens deve atingir o pico de produção e/ou eventualmente extinguir-se nas próximas décadas (DALY [25] e JACKSON [7]).

O modelo inicial que representa o fluxo de dinheiro e de bens e serviços em uma economia é chamado de diagrama do fluxo circular (KRUGMAN e WELLS

[12]). No diagrama de fluxo circular, como apresentado nos textos introdutórios de economia, o meio ambiente não é representado. O esquema inicial do fluxo circular da renda é representado pelas famílias, firmas e governo, com fluxos financeiros e de bens e serviços entre eles. Neste esquema, todos os fatores de produção são considerados como de propriedade das famílias, sendo transferidos às firmas em troca de remuneração. Além, as firmas fornecem bens e serviços às famílias em troca de pagamento financeiro. O governo cobra impostos das famílias e firmas, assim concede subsídios às firmas e transferências às famílias. Finalmente, o governo fornece bens e serviços às famílias e às firmas.

A inclusão do meio ambiente no fluxo circular da renda ocorre com o reconhecimento de que parte dos fatores de produção são transferidos do meio ambiente para as famílias (e posteriormente, para as firmas), além do fato de que o meio ambiente recebe rejeitos provenientes das famílias e firmas. Assim, a representação das relações entre a atividade econômica e o meio ambiente, como exemplificado na figura 5.1, reconhece o fluxo de serviços prestados pelo ambiente, tais como os serviços de suporte à vida (ciclo de nutrientes, formação do solo, regulação do clima, purificação da água, controle de pestes, entre outros), serviços de provisão de matérias primas diversas (recursos naturais como água, comida, madeira e fibras, combustíveis, entre outros), amenidades (serviços estéticos, espirituais, culturais, recreacionais, educacionais, entre outros) e, finalmente, o serviço que meio ambiente presta ao ser o depósito final de resíduos da produção econômica. Na figura 5.1, o sistema econômico, representado pelo retângulo interior, é considerado um subsistema do meio ambiente, o qual é representado pelo retângulo exterior. Este capítulo fará uma breve revisão dos esforços de economistas com vistas a, em última análise, incluir o meio ambiente na teoria econômica.

5.1.2 Equilíbrio de Mercado e Falhas de Mercado

A metáfora estabelecida por Adam Smith afirma que os diversos agentes do mercado, ao perseguirem seus objetivos individuais, são guiados por uma mão invisível que resulta na organização dos mercados de bens e serviços, apesar de não haver a figura de um agente coordenador deste mercado. Dessa maneira, os bens e serviços estão disponíveis no mercado, não pela benevolência de seus produtores, mas porque estes objetivam se apropriar dos lucros decorrentes das vendas destes bens e serviços para os consumidores. No fim das contas, o equilíbrio dos mercados decorre das busca dos objetivos individuais de cada um de seus participantes.

No mercado eficiente os preços e as quantidades transacionadas são determinados tendo em vista a oferta e a procura dos bens. A lei da oferta e da procura descreve este comportamento. Do lado da demanda, quanto maior o preço do bem, menor

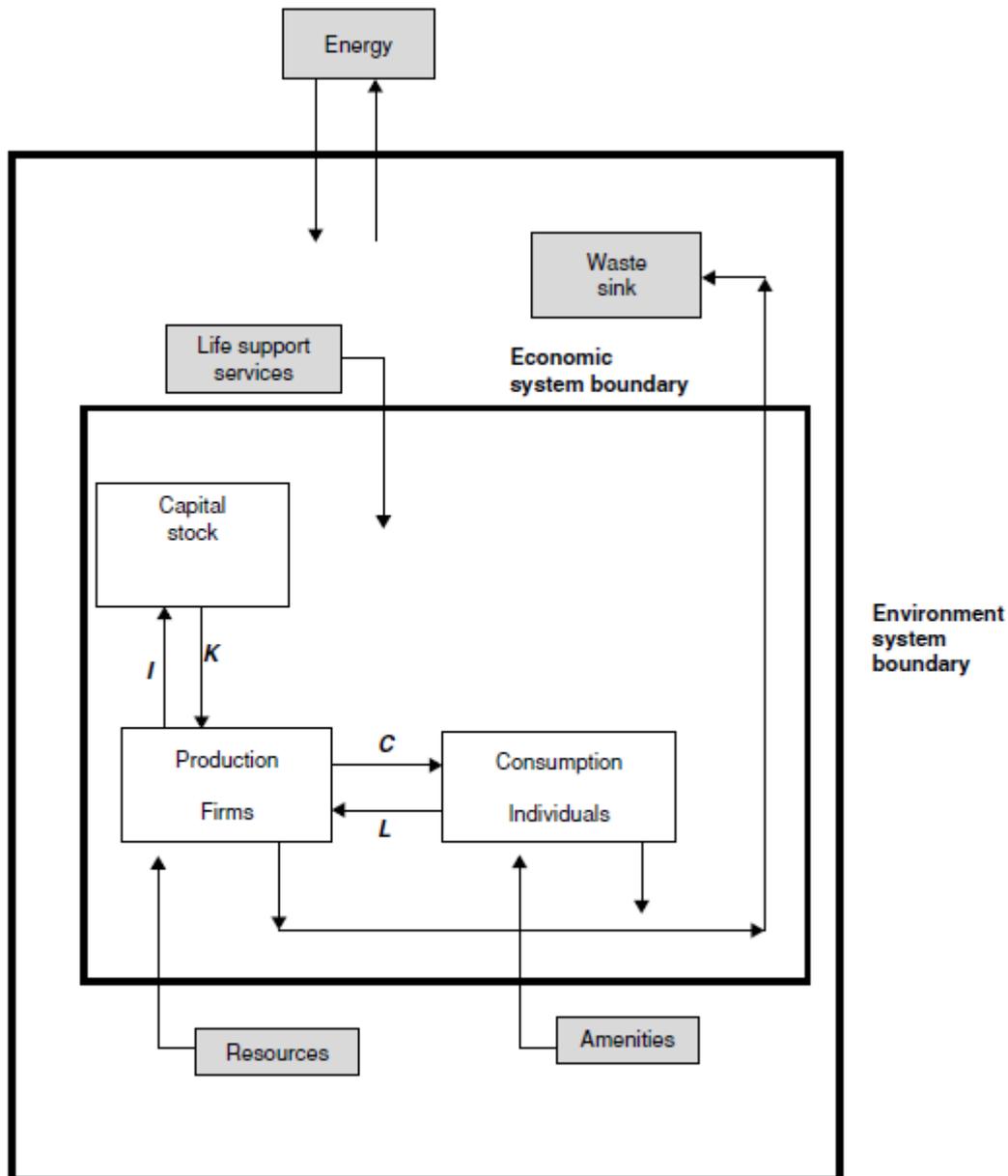


Figura 5.1: Incluindo o meio ambiente: representação das relações entre a atividade econômica humana e o meio ambiente (fonte: COMMON e STAGL [2]).

a demanda porque menos consumidores estarão dispostos a pagar um preço alto para adquirir o bem em questão. Alternativamente, quanto menor o preço, maior a demanda. Do lado da oferta, quanto maior o preço, mais produtores estarão interessados em produzir tal bem e, como consequência, maior a quantidade total ofertada. Pela mesma lógica, ainda pelo lado da oferta, quanto menor o preço, menor quantidade ofertada total. Ocorre que um excesso de demanda ocasiona pressão de alta de preços, enquanto que um excesso de oferta ocasiona pressão de baixa nos preços. Dessa maneira, o preço de equilíbrio é o preço para o qual a quantidade demandada é igual à ofertada.

Quando o preço de um bem transacionado se afasta do preço de equilíbrio o seguinte mecanismo de compensação age de forma a conduzir o mercado novamente ao equilíbrio: preço maior induz mais oferta e menos demanda. Mas isso gera excesso de oferta, o que gera uma pressão de queda no preço, conduzindo-o ao preço de equilíbrio. Alternativamente, preço menor conduz a menos oferta e mais demanda, gerando excesso de demanda. O excesso de demanda gera pressão para a alta de preços, conduzindo o mercado ao equilíbrio novamente. Esta é a dinâmica do equilíbrio de mercado.

A teoria econômica desenvolvida na economia do meio ambiente e de recursos naturais afirma que o valor econômico dos recursos ambientais geralmente não é observável no mercado (PERMAN *et al.* [3]). Inicialmente, é importante destacar que em relação aos recursos naturais muitas vezes os direitos de propriedade não estão completamente definidos. Os direitos de propriedade atribuem a indivíduos ou a organizações os direitos de controlar o acesso a certos recursos ou ativos, incluindo o direito de cobrar pelo seu uso (MOTTA [39]). Esta condição está na origem das falhas de mercado observadas: bens públicos e externalidades. Estas falhas, no fim das contas, impedem que o mercado e o seu sistema de preço seja adequado para definir um nível ótimo de consumo dos recursos naturais.

As externalidades são custos decorrentes de uma transação que recaem sobre agentes que, a princípio, não tinham nada a ver com a transação. Por exemplo, o consumidor de gasolina, ao utilizá-la, gera emissões de gases do efeito estufa, tal como o gás carbônico - a poluição. Os custos da poluição, no entanto, recaem também sobre outros agentes que não participaram da transação compra/venda de gasolina. Em relação às externalidades, inicialmente é importante lembrar que ela acontece quando a produção ou decisão de consumo de um agente do mercado têm um impacto na utilidade ou lucro de outro agente de forma não intencional, não havendo compensação ou pagamento feito pelo gerador do impacto àquele agente afetado pelo impacto gerado (PERMAN *et al.* [3]). Assim, os cálculos privados de custos ou benefícios diferem dos custos ou benefícios da sociedade e o bem-estar do indivíduo é afetado não apenas pelas suas atividades de consumo como também pelas atividades de outros indivíduos (MOTTA [39]). Como uma parte dos custos não está expressa nos preços praticados pelos agentes (e esta parte do custo recai também sobre outros agentes), os mercados conduzem a um equilíbrio de mercado, com preço e quantidades transacionadas diferentes do que seria caso fossem incluídos os custos externos ou externalidades. Assim, o mercado não é eficiente na medida em que o resultado obtido não produz o máximo bem-estar para a sociedade.

Já os bens públicos são não rivais e não excludentes. Não rivais no sentido de que o consumo deste bem por um agente não diminui a quantidade disponível deste mesmo bem para o restante dos agentes do mercado. Não excludentes no

sentido de que não se pode impedir que uma pessoa consuma o bem ou serviço. Há ainda uma característica de indivisibilidade, o que faz com que todo indivíduo tenha acesso à mesma disponibilidade do bem público. Exemplos de bens públicos, que são bens de livre acesso e que podem ser consumidos por qualquer pessoa, são: iluminação pública e praças, defesa nacional, praias públicas e beleza cênica. A execução das estratégias individuais dos agentes de mercado em relação aos bens públicos, dadas suas características de livre acesso e a impossibilidade de exclusão do consumo por meio de cobrança, pode conduzir a uso excessivo¹. Isso porque, a lei da oferta e da demanda não se aplica aos bens públicos. É muito difícil coletar um preço pelo uso do recurso ou bem quando não há exclusividade de direitos de uso ou de propriedade. Dessa maneira, para o caso de recursos naturais sem direito de propriedade definida, os preços não servem para racionar o uso e gerar receitas para sua conservação resultando em consumo excessivo, exaustão ou degradação (MOTTA [39]).

5.1.3 Sustentabilidade Fraca e Forte

Para muitos economistas, a principal questão acerca da sustentabilidade é se a utilização na produção de um recurso natural por um tempo indefinidamente longo é possível. Como muitos recursos naturais não são renováveis, há necessariamente apenas uma quantidade finita disponível. Como garantir que as gerações futuras receberão como legado a capacidade de produção e manutenção de padrões de consumo adequados? Formalmente, o problema que se coloca é a busca por um caminho de consumo através do tempo que resulte na maximização factível do bem estar, representado pela letra W . Isto corresponde a maximizar a utilidade intertemporal, como no modelo de crescimento ótimo. Assim, o modelo de crescimento ótimo é enunciado como a maximização do bem-estar (W):

$$\text{Maximizar}_{C_t} \quad W = \int_{t=0}^{t=\infty} U(C_t)e^{-\rho t} dt \quad (5.1)$$

Sujeito a:

$$\frac{dK}{dt} = Q(K_t, R_t) - C_t \quad (5.2)$$

¹Esta tendência de consumo excessivo dos bens comuns foi postulada pelo economista Garret Hardin, em 1968, em artigo intitulado, A tragédia dos Comuns. A abordagem de Hardin, no entanto, foi muito criticada posteriormente. Trabalhos como o de Elinor Ostrom mostraram que existem diversos exemplos de bens públicos que são gerenciados comunitariamente, como terras, lagos e sistemas de irrigação, que não foram explorados de forma predatória. De fato, em seu artigo original, Hardin não fez distinção entre bens comuns que eram cultivados coletivamente por um grupo específico de indivíduos e os bens públicos de livre acesso. Permanece, no entanto, o entendimento de que a falta de definição de direitos de propriedade é o problema central dos bens públicos (FATHEUER [40]).

$$\frac{dS}{dt} = -R_t \quad (5.3)$$

$$\bar{S} = \int_{t=0}^{t=\infty} R_t dt \quad (5.4)$$

Onde, a utilidade $U(C_t)$ é função do consumo no tempo t (C_t). $Q(K_t, R_t)$ é a função de produção no tempo t que depende da quantidade de capital (K) e da quantidade de recurso não renovável (R) empregados no tempo t . Finalmente, S é o estoque finito do recurso não renovável.

Assim, a restrição expressa na equação 5.2 indica que a taxa de investimento de capital deve corresponder ao nível de produção menos o consumo em cada tempo t . Esta restrição indica, portanto, que há dois destinos para a produção: investimento ou consumo. A restrição expressa na equação 5.3 indica que o estoque do recurso natural não renovável S decresce na medida em que é utilizado ao longo dos períodos, isso porque o recurso é não renovável. E a equação 5.4 indica que o consumo total do recurso não renovável ao longo dos períodos, que é representado por $\int_{t=0}^{t=\infty} R_t dt$, não pode ser maior do que o estoque inicial, representado por \bar{S} .

Se a função de produção depende do nível de capital e do recurso natural, ela pode ser entendida como se os fatores capital e recurso natural fossem complementares ou substitutos. Na situação em que estes dois fatores são complementares, cada nível de produção Q_n requer uma quantidade mínima de recursos naturais, não importando quanto de capital é usado. Assim, os recursos naturais são essenciais para a produção não havendo possibilidade de substituição destes por capital. Se não há entrada de recursos naturais, não há produção. A sustentabilidade da produção utilizando o recurso natural não renovável não é factível, dado que é impossível dividir uma quantidade finita do recurso intertemporalmente em um horizonte infinito de tempo, num problema conhecido como *cake-eating*.

Na situação em que os fatores da função de produção capital (K) e recurso natural (R) são substitutos, a falta do recurso natural pode ser suplantada por capital a fim de manter o nível de produção. Neste caso, havendo capital suficiente, a produção pode ser mantida e a sustentabilidade é factível, desde que sejam observadas algumas condições conhecidas como Regras de Hartwick a serem detalhadas mais adiante neste trabalho na secção 5.1.4 a partir da página 36. A principal destas condições estabelece que toda a renda de escassez decorrente da extração do recurso natural não renovável seja aplicada em capital não manufaturado. O esgotamento dos recursos naturais não significa necessariamente queda da produção, do consumo e, por conseguinte, da utilidade. O problema de maximização intertemporal do bem-estar torna-se factível.

Assim, são delineadas duas correntes de pensamento: sustentabilidade fraca e forte. Para ambas linhas, o desenvolvimento sustentável ou sustentabilidade está

associado à maximização do bem estar intertemporalmente, assim como proposto no modelo de crescimento ótimo. Assim, o problema é formulado como a maximização da utilidade intertemporal. A utilidade sob ambos pontos de vistas é tomada como função do consumo. A função de produção, por sua vez, depende do capital (K) e de recursos naturais (R). Dessa maneira, a questão que se coloca é como manter as possibilidades de produção e consumo para as gerações futuras, maximizando sua utilidade, tendo em vista que a produção depende da disponibilidade de recursos naturais não renováveis. A divergência entre a sustentabilidade forte e fraca se dá a respeito do grau de substitutibilidade entre capital reproduzível e natural.

Podemos dividir o capital em:

1. Capital natural: qualquer estoque provido naturalmente tais como aquíferos, terra, petróleo, gás, florestas, peixes, estoques de biomassa, material genético, a atmosfera do planeta, entre outros.
2. Capital físico: plantas industriais, equipamentos, infraestrutura física, entre outros.
3. Capital humano: estoque de habilidades aprendidas por indivíduos que aumentam sua produtividade.
4. Capital intelectual: habilidades desincorporadas e conhecimento útil, compreendendo o estoque de conhecimento de cultura, tecnologia, entre outros.

Se o capital feito pelos humanos, ou capital reproduzível, é classificado como a soma dos capitais físico, humano e intelectual, temos que a sustentabilidade fraca estabelece que, para garantir a sustentabilidade, o estoque total de capital (natural + reproduzível) não deve declinar intertemporalmente.

À exemplo da sustentabilidade fraca, os defensores da sustentabilidade forte partem do princípio de que a sustentabilidade consiste na manutenção do consumo ou utilidade ao longo das gerações. No entanto, sob esta linha de pensamento, a substitutibilidade entre capital natural e reproduzível não é assumida como possível. Assim, os economistas que defendem a sustentabilidade forte entendem que a sustentabilidade depende de que o capital natural entre gerações não seja declinante.

A figura 5.2 exhibe funções de produção dependentes de capital (K) e recursos naturais (R). São representadas isoquantas para três tipos de função de produção. No esquema *a*, a substitutibilidade é completa ($Q_t = \alpha K_t + \beta R_t$). O esquema *b* indica uma função de produção do tipo Cobb-Douglas ($Q_t = K_t^\alpha R_t^\beta$, com $\alpha + \beta = 1$) onde a substitutibilidade é possível. O esquema *c* é uma função de produção que estabelece a não substitutibilidade entre capital e recurso natural ($Q_t = \min(\alpha K_t, \beta R_t)$).

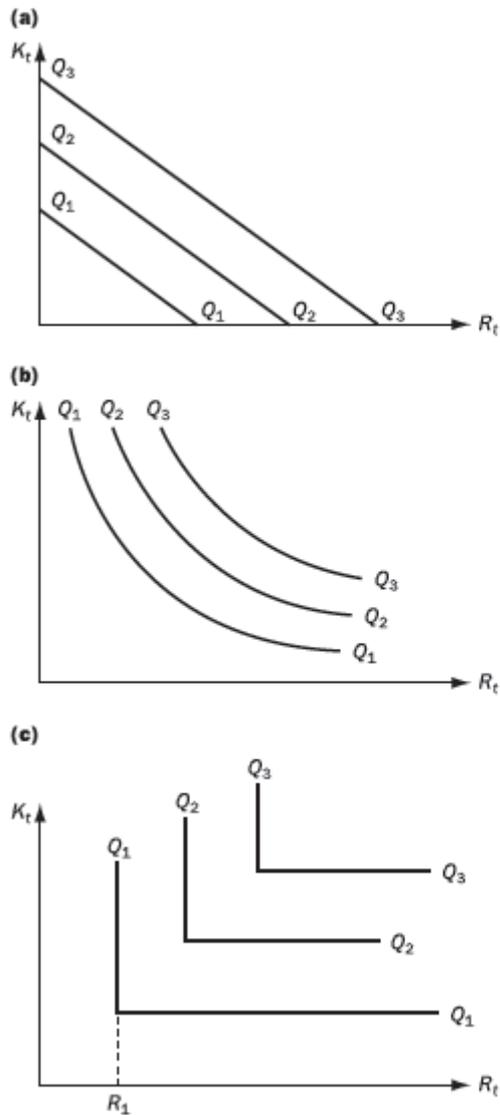


Figura 5.2: Substitutibilidade entre capital (K) e recursos naturais (R). Isoquantas para três tipos de função de produção (fonte: PERMAN *et al.* [3]).

5.1.4 Regra de Hartwick

John Hartwick buscou identificar sob que condições o consumo constante poderia ser mantido indefinidamente, dado o uso essencial na produção de inputs vindos de um estoque finito de um recurso natural não renovável (PERMAN *et al.* [3]). Partindo do problema de maximização intertemporal do bem estar sujeito às restrições propostas no modelo de crescimento ótimo, Hartwick considerou que a função de produção era descrita por uma função Cobb-Douglas com retornos de escala constantes, como no esquema *b* da figura 5.2.

A regra de Hartwick estabelece que, neste caso, o consumo constante é factível desde que vigorem as seguintes condições:

1. $\alpha > \beta$.

2. A renda de escassez da extração do recurso natural não renovável é aplicada em investimento em capital manufaturado substituto. A renda de escassez é a diferença entre o preço de venda da unidade de recurso não renovável e o custo marginal de extração da unidade do recurso.
3. As restrições de eficiência intertemporal do modelo de crescimento ótimo sejam atendidas (restrições das equações 5.2, 5.3 e 5.4).

No fim das contas, a regra de Hartwick exige que o valor total do estoque de capital mais o estoque de recurso não renovável sejam mantidos constantes ao longo do tempo. Enquanto o valor do estoque de recurso diminui, o valor de capital aumenta em compensação. A ideia consiste que o investimento compensa as gerações futuras pelas perdas de ativos causados pelo consumo e produção correntes.

A primeira consideração a respeito da regra de Hartwick é que ela assume a substitutibilidade entre capital e recursos não renováveis ao tomar a função de produção como uma Cobb-Douglas. Alguns economistas, no entanto, discordam dessa premissa porque acreditam que estes fatores sejam complementares e não substitutos, como apontado acima. A regra de Hartwick é essencialmente um resultado matemático e é exigido $\alpha > \beta$. Assim, para que a substitutibilidade ocorra, deve existir capital suficiente para compensar a depleção do recurso. Além, para garantir a sustentabilidade exige-se que a extração do recurso seja realizada com eficiência intertemporal, quando não há maneira de mudar o uso do recurso em um período a fim de aumentar a produção sem diminuir a produção em outro período.

Finalmente, há dificuldade em se garantir que a renda de escassez será integralmente aplicada em capital reproduzível. A renda de escassez pode ser coletada pelos governos por meio da cobrança de royalties, os quais devem ser destinados a investimento em capital reproduzível. Algumas políticas são propostas para garantir a aplicação dos royalties em capital, entre elas, reformas institucionais, com a criação de fundos soberanos e a criação de estruturas contábeis e fiscais específicas. No entanto, é bem evidente a dificuldade em garantir que a renda de escassez seja aplicada integralmente como prescreve a regra de Hartwick.

5.2 Recursos Não Renováveis

Recursos naturais não renováveis são aqueles para os quais não há reposição ou crescimento em uma escala de tempo observável ao homem, tais como minerais e combustíveis fósseis.

Um recurso natural não renovável tem valor econômico porque sua exploração tem capacidade de gerar bem estar. A reserva do recurso natural exaurível se diferencia de outros ativos em economia por não gerar dividendos. Para o caso dos

recursos naturais não renováveis, pelo fato de necessariamente existir um estoque finito, o uso de tais recursos envolve decisões intertemporais. Decisões intertemporais implicam opções feitas no presente, mas que apresentam consequências no futuro. O custo de uso de um recurso exaurível decorre do fato de que a sua extração hoje implica em não extração no futuro. Há, portanto, um custo de oportunidade intertemporal que é chamado de custo de uso. O custo de uso representa o valor que as gerações presentes devem pagar, ou reduzir de sua renda, de forma a compensar as gerações futuras pelo esgotamento destes recursos.

Recursos totais são a quantidade total que se acredita existir de um recurso não-renovável em um sentido físico, guardando pouca ou nenhuma relação com medidas econômicas de estoque de recursos. Os recursos, por sua vez, são divididos em recursos hipotéticos, recursos condicionais e reservas. Os recursos hipotéticos são a parcela de recursos que se acredita existente, mas que ainda não foi descoberta. Os recursos condicionais são a parcela de recurso existentes que foram descobertas, mas que ainda não há viabilidade técnica e econômica de exploração. As reservas são recursos cuja extração é viável do ponto de vista técnico e econômico a um determinado preço. Corresponde a um conceito dinâmico que depende, por exemplo, do desenvolvimento tecnológico que influencia no custo de extração, de novas descobertas de recursos e de condições econômicas - como o preço que afeta a viabilidade de extração.

Diversos fatores podem influenciar o tamanho das reservas de um recurso natural de um país, tais como: o desenvolvimento tecnológico com, por exemplo, o barateamento de uma *backstop technology*², variações de preço do recurso não renovável que tornam mais ou menos viável a sua extração e novas descobertas de recursos que estejam em condições economicamente viáveis de extração. Alguns outros fatores que influenciam as reservas são: ritmo de exploração, investimento em tecnologia de localização e extração do recurso, escassez do recurso não renovável que determina o preço, *royalty* e a viabilidade econômica para exploração.

5.2.1 Nível Ótimo de Extração de Recursos Não Renováveis e Regra de Hotelling

Harold Hotelling estudou as regras de uso ótimo de recursos naturais não renováveis ou exauríveis (HOTELLING [41]). A estratégia de extração ótima de um recurso exaurível deve considerar aspectos intertemporais e a comparação com outros ativos

²*Backstop technologies* são novas tecnologias que produzem um substituto ao recurso natural com o potencial de deixar obsoletas as reservas deste recurso quando o custo médio de produção do substituto é menor do que o preço do recurso não renovável. Por exemplo, a tecnologia de produção de energia fotovoltaica pode ser percebida como uma *backstop technologies* da produção de energia elétrica com o uso de combustíveis fósseis.

econômicos. O problema levantado por Hotelling procura determinar qual a trajetória intertemporal de extração de um recurso natural exaurível que maximiza o retorno da exploração deste recurso. De forma simplificada, o problema apresentado consiste em maximizar o valor presente líquido da extração, sujeito à quantidade existente de recursos.

Hotelling partiu de um conjunto de premissas bem definidas para indicar que, para seguir uma trajetória ótima, os preços dos recursos exauríveis devem evoluir ao ritmo da taxa de desconto social que, segundo uma de suas premissas, equivale-se à taxa de mercado. O modelo proposto por Hotelling assumiu as seguintes premissas:

1. O detentor da reserva é um proprietário privado atuando em um mercado concorrencial (concorrência perfeita).
2. O estoque do recurso exaurível é conhecido e não se altera ao longo do tempo (a não ser pelo consumo, é claro).
3. A demanda pelo recurso exaurível é decrescente com o seu preço e o recurso se esgota no tempo final T .
4. O custo marginal de extração é constante.
5. A taxa de preferência intertemporal do produtor (ρ , taxa de desconto) é constante e igual a taxa de juros do mercado (r).
6. A informação é perfeita ao longo de todo o período de extração.

Segundo o modelo de Hotelling, o preço do recurso natural deve aumentar com o tempo de acordo com a taxa de juros do mercado (r), que neste caso é igual à taxa de desconto social (ρ). A diferença entre o preço de venda do recurso e seu custo marginal - que no modelo é considerado constante - é exatamente o valor do *royalty*. Nestas condições, e valendo as demais premissas do modelo de Hotelling, a trajetória de extração do recurso natural exaurível seria ótima. Assim, quanto mais escasso o recurso natural maior o preço líquido e maior o *royalty* cobrado dado que o custo marginal é constante.

O *royalty* significa o custo de oportunidade intertemporal decorrente da extração do recurso natural exaurível, uma vez que a extração hoje implica na não extração no futuro. Assim, o *royalty* representa a renda de escassez, que é a diferença entre o preço de venda da unidade de recurso não renovável e o custo marginal de extração da unidade do recurso. Em um mercado de concorrência perfeita, o preço de mercado dos produtos se iguala aos custos marginais de produção. Para o caso dos recursos exauríveis, no entanto, há a aplicação da renda de escassez por conta do custo de uso, o que afasta o preço de mercado do custo marginal de extração. Segundo o

modelo de Hotelling, em um mercado de concorrência perfeita, os proprietários dos recursos naturais exauríveis devem esperar que o preço líquido dos recursos (preço líquido = preço de mercado menos custo marginal) cresça a uma taxa equivalente à taxa de juros de mercado. Esta diferença entre o preço de mercado e o custo marginal de extração equivale exatamente ao *royalty*, como explicado acima.

A teoria econômica afirma, portanto, que o mercado sempre sinalizará a escassez do recurso exaurível e, conseqüentemente, restringirá o consumo através da elevação do preço do recurso e do *royalty*. O contrário é também verdadeiro, recursos abundantes serão impelidos ao consumo pela baixa dos preços (*royalty* nulo ou desprezível). No entanto, na prática, o modelo sugerido por Hotelling não se verifica e recebeu diversas críticas, detalhadas a seguir.

5.2.2 Críticas a Hotelling

Inicialmente, observa-se que para os recursos naturais exauríveis é muito mais comum haver mercados que são dominados por poucas e grandes empresas que ditam o ritmo de produção e a política dos preços. Dessa maneira, há imperfeições de mercado por meio da ação de monopólios e oligopólios. Há também a presença de externalidades, com apenas uma parcela dos custos decorrentes da exploração do recurso recaindo sobre o agente que o extrai, principalmente no caso de propriedades de uso comum. Assim, a premissa no modelo de Hotelling de que o mercado está em concorrência perfeita, com informação perfeita e sem externalidades é frequentemente questionada.

A premissa de que o custo marginal de extração é constante é bastante idealizada e contraria outra premissa corrente assumida pelos economistas na qual o custo marginal é crescente. Especificamente para o caso dos recursos exauríveis, o custo marginal crescente é o que se verifica frequentemente.

As preferências das gerações futuras são desconhecidas então é difícil estimar suas curvas de demanda a priori. O desconhecimento da demanda futura leva a hipótese de que ela seja igual à presente, no entanto, esta conduta desconsidera totalmente os valores das gerações futuras. Argumenta-se que a única maneira de atribuir preço a um recurso não reproduzível é ter todos os interessados fazendo suas ofertas. Se somente alguns interessados, a geração presente, derem seus lances como, de fato, acontece, os preços serão naturalmente mais baixos (PEARCE e TURNER [42]).

Adicionalmente, a respeito da premissa na qual o estoque de recursos inicial é conhecido e constante, argumenta-se que o conceito de reserva é dinâmico com alterações do estoque decorrentes do desenvolvimento tecnológico, de condições econômicas e novas descobertas.

Além disso, há que se comentar a existência de *backstop technologies*, que são

alternativas geradas a partir de tecnologias diferentes que, na prática, impedem que o *royalty* cresça acima de um certo limite, a partir do qual o consumidor demandaria o bem proveniente da tecnologia alternativa.

Ademais, há profundas discrepâncias entre as taxas de desconto social e as taxas privadas de mercado. Esta condição compromete a possibilidade de se assegurar que os recursos sejam alocados de forma compatível com a otimização do bem-estar social, uma vez que as taxas de mercado costumam ser maiores do que as taxas de desconto social.

5.2.3 Fatores que Influenciam o Ritmo de Extração

Como prescrito no modelo de Hotelling, a taxa de extração é tanto maior quanto menor for o valor do *royalty*. No entanto, na prática, existem muitos outros fatores que podem influenciar o ritmo de extração. Há fatores que diminuem o ritmo de extração por gerarem uma valorização do recurso a uma taxa acima da taxa de mercado, tais como: a elevação da demanda, o esgotamento de fontes alternativas e a descoberta de novos usos.

Aliás, a taxa de extração é diretamente proporcional à taxa de desconto. Uma elevação na taxa de juros de mercado conduz ao aumento da taxa de extração, encurtando o prazo de esgotamento dos recursos. O inverso, com diminuição da taxa de juros de mercado, conduz a uma diminuição do ritmo de extração. Assim, a política monetária afeta a variação dos preços do recurso natural. Por exemplo, uma política monetária frouxa (com a taxa de juros baixa apesar da existência de inflação) tende a gerar mais inflação e aumentar a variação de preço do recurso natural. Porém, uma variação de preço maior, induz os produtores a postergar a extração do recurso natural. Alternativamente, uma política monetária rígida (com aumento da taxa de juros para combater a inflação), diminui a variação do preço. Com isso, os produtores aceleram a extração dos recursos naturais.

O desenvolvimento tecnológico também possui impacto na taxa de extração porque reduz o custo marginal de extração e torna viáveis *backstop technologies*. Dessa maneira, o desenvolvimento tecnológico tem potencial para transformar recursos condicionais em reservas, aumentando o estoque de recursos exauríveis cuja exploração é viável técnica e economicamente. A redução do custo de extração, consequentemente, reduz o preço do recurso natural induzindo a um aumento da demanda e ritmo de extração. No entanto, o desenvolvimento de *backstop technologies* com a utilização de recursos substitutos induz a diminuição da demanda em prol deste substituto. Esta tendência, por sua vez, reduz o ritmo de extração. Assim o desenvolvimento tecnológico atua nas duas frentes aumentando e/ou diminuindo o ritmo de extração.

Além disso, o desenvolvimento tecnológico propicia a descoberta de novas jazidas. A descoberta de novas reservas tem efeito sobre os preços porque torna o recurso natural menos escasso, fazendo reduzir seu preço e aumentar sua taxa de extração.

Em mercado sem concorrência perfeita, com a presença de monopólios ou oligopólios, o ritmo de extração pode ocorrer em função das estratégias das empresas participantes e não em função da maximização do bem-estar. É muito mais uma regra do que exceção, para o mercado de recursos naturais exauríveis, que este seja dominado por poucas e grandes empresas que controlam o ritmo da produção e da política de preços de forma a maximizar o seu lucro privado e não o bem-estar social. De forma que as empresas monopolizadoras podem reduzir a produção para forçar aumento de preço e maximização de seu lucro, ainda que esta ação não seja ótima do ponto de vista de maximização da utilidade intertemporal.

5.3 Recursos Renováveis

Recursos naturais são chamados de renováveis quando há a capacidade de reprodução ou crescimento em uma escala de tempo observável ao homem, incluindo categorias diversas como populações de organismos biológicos - que possuem capacidade natural de reprodução e crescimento -, assim como, água e sistema atmosférico que são reproduzidos por processos físicos e químicos (PERMAN *et al.* [3]).

Recursos renováveis podem ser divididos em recursos de fluxo e de estoque. Recursos renováveis de fluxo são recursos para os quais sua exploração hoje não afeta a disponibilidade deste recurso no futuro. Os recursos renováveis de estoque, por sua vez, possuem um determinado nível de estoque e uma taxa de reposição. Neste caso, a exploração deve acontecer a uma taxa que não exceda a taxa de reposição porque, caso contrário, a exploração pode conduzir à degradação ou exaustão do recurso renovável em questão. Por conta desta condição, a teoria econômica concentra-se no estudo de recursos renováveis de estoque.

5.3.1 Modelo Estático de Gestão

A dinâmica do estoque de recursos renováveis é muitas vezes descrita como um modelo de crescimento logístico, no qual a taxa de crescimento do estoque ou população ($G(S)$) é função do nível de estoque ou da quantidade de indivíduos nesta população (S). Este modelo é adequado para descrever populações (como a de peixes, por exemplo) porque reflete a competição a que estas populações estão submetidas - competição por espaço físico, alimentos, oxigênio, por exemplo (COMMON e STAGL [2]). Nesse sentido, existe um nível populacional para o qual a taxa de crescimento da população é máxima, a partir do qual a população cresce a taxas

cada vez menores, representada na figura 5.3 como S_{MSY} . Assim como existe um nível de população, digamos S_{max} , para o qual a taxa de crescimento populacional é zero, que representa a capacidade máxima de suporte. A partir deste estoque máximo S_{max} a população não cresce mais. Um exemplo de equação logística como a descrita acima é:

$$G(S) = gS\left(1 - \frac{S}{S_{max}}\right) \quad (5.5)$$

onde $g > 0$ é uma constante, um parâmetro ecológico que reflete o potencial de crescimento da população descrita.

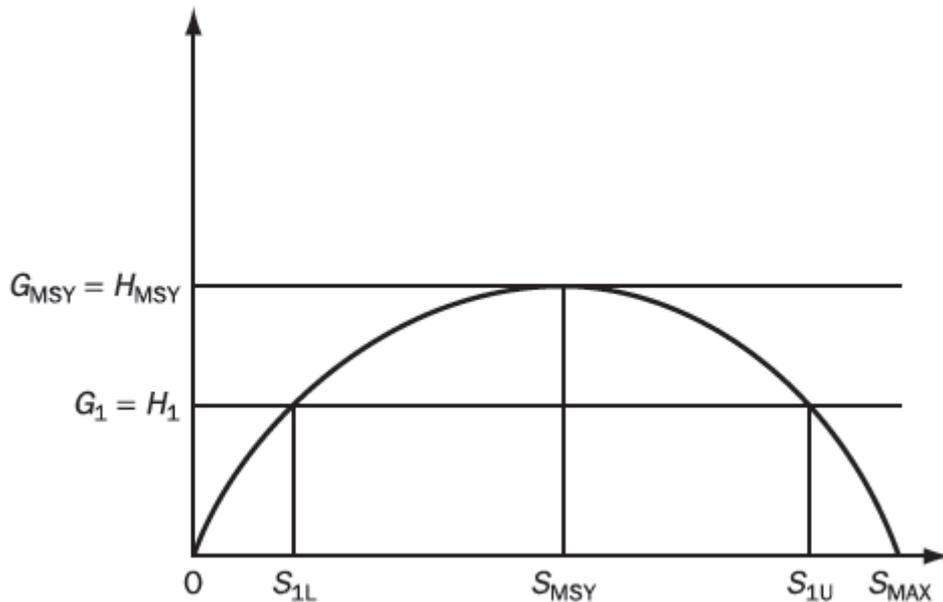


Figura 5.3: Crescimento da população refletindo sua dependência em relação ao nível da população como na equação 5.5, onde $G(S) = gS\left(1 - \frac{S}{S_{max}}\right)$.(fonte: PERMAN *et al.* [3]).

Dado um nível de estoque S_{1L} , caso a taxa de exploração do recurso natural, H_1 , se iguale à taxa de crescimento da população, G_1 , a população estaria em estado estacionário, uma vez que a quantidade explorada é igual ao crescimento ($G_1 = H_1$), como demonstrada na figura 5.3. De fato, se as taxas de extração, $H(S)$, se igualam a $G(S)$ ao longo da curva, a população estaria em equilíbrio ou estado estacionário. Similarmente, para o nível de estoque S_{1U} , o ritmo de exploração $H_1 = G_1$ também permite o estado estacionário da população.

A determinação da taxa de exploração máxima, H_{MSY} , a ser praticada no nível de população S_{MSY} , assim como a capacidade máxima de suporte, S_{max} , dependem unicamente das características biológicas do recurso renovável, isto é, da capacidade de produção do ecossistema em questão. Para determinação de H_{MSY} não

há critérios econômicos, de forma que sua aplicação não implica necessariamente o ótimo econômico. Além disso, esta análise não leva em conta os custos de exploração, o que seria um componente importante para a identificação do ótimo econômico. Dessa maneira, para determinar a quantidade ótima a ser explorada do recurso renovável é necessário a investigação em um submodelo econômico.

De fato, o modelo estático é subdividido em: submodelo biológico, como explicado acima, e submodelo econômico.

No submodelo econômico, a função de produção $H(E, S)$ (quantidade pescada por unidade de tempo) é dependente do nível de estoque S e do esforço empregado E (por exemplo, as horas-barco dedicadas à pesca). Isso parece razoável porque é de se supor que quanto mais peixes, mais fácil a exploração e, também, até certo limite, quanto mais esforço de pesca, maior a produção.

Assim, a taxa de extração do recurso renovável $H(E, S)$ é definida como:

$$H(E, S) = eES \quad (5.6)$$

Onde S é o nível de estoque ($\frac{dH}{dS} > 0$ indicando que a produção aumenta com o aumento do estoque), E é esforço de pesca como a quantidade de recursos empregada na atividade e, finalmente, e é uma constante parâmetro do modelo.

Já a função custo é construída como dependente linearmente apenas do esforço E :

$$C(E) = wE \quad (5.7)$$

Onde w é o custo por unidade de esforço empregado, aqui considerado constante. O fato de a função custo ser dependente linearmente do esforço E é uma clara simplificação do modelo.

Finalmente, considerando P como o preço de mercado do recurso renovável, a função lucro é dada por:

$$\pi(E, S) = PH - C = PeES - wE \quad (5.8)$$

O estado estacionário de um estoque de recurso natural é atingido quando a taxa de exploração de tal recurso se iguala à sua capacidade de reposição. Nessas condições, o estoque de recurso natural renovável seria mantido constante indefinidamente, sendo explorado a uma taxa sustentável. Segundo o modelo estático de exploração de recursos renováveis, apresentado acima, para esforços de exploração constantes, a situação de equilíbrio é justamente quando a taxa de extração se iguala à taxa de reposição do recurso. Isso porque, caso a taxa de extração seja maior do que a reposição, isso irá diminuir o estoque. Mas a diminuição do estoque diminuirá a taxa de extração, conduzindo ao estado estacionário. Alternativamente, caso a

taxa de extração seja menor do que a reposição, isso irá aumentar o estoque. Mas o aumento do estoque aumenta a taxa de extração. Esta dinâmica ocorre até que seja atingido o estado estacionário, para o qual a taxa de extração é igual à taxa de reposição, dado um nível de esforço constante.

Assim, para diferentes níveis de esforço constante de pesca (digamos, E_1 , E_2 e E_3), o modelo conduz a um estado estacionário no qual $G(S) = H$. Esta análise do estado estacionário suscita a pergunta seguinte: qual deve ser o nível de esforço (E , quantidade de recursos empregados na extração, como, por exemplo, horas-barco) para que o nível de extração seja ótimo?

Acesso Privado e Acesso Livre

A principal característica dos modelos estáticos que representam a exploração de recursos renováveis é que possuem foco em estados de equilíbrio, tanto em sua versão de acesso livre como em sua versão de acesso privado. No acesso livre, não há direito de propriedade bem definido sobre o recurso e não há barreiras à entrada de novos produtores. Nestas condições, os agentes exploram o recurso enquanto o lucro econômico ($\pi(E, S)$) é maior do que zero. A partir deste ponto, não há exploração, pois nesse caso valeria a pena alocar os recursos em outras atividades produtivas.

Já no modelo de acesso privado, onde há direito de propriedade do recurso natural bem definido, os agentes que possuem o recurso renovável procuram maximizar os seus lucros econômicos ($\pi(E, S)$). O ponto em que o lucro do agente é máximo ocorre quando sua receita marginal (R_{mg}) é igual a seu custo marginal de produção (C_{mg}).

Em ambos os tipos de acesso ao recurso, o modelo conduz a um equilíbrio bioeconômico, no qual a quantidade de estoque permanece constante ao longo dos períodos, dado que se considera $G(S) = H(S)$, e o esforço de pesca é constante - isto é, no equilíbrio, não há incentivos à entrada ou saída de agentes, com aumento de frota ou tempo de pesca.

A tabela 5.1 sumariza as condições de equilíbrio bioeconômico para acesso livre e privado, assim como relaciona as soluções analíticas para o estoque ótimo (S^*), esforço ótimo (E^*) e produção ótima (H^*) para ambos os tipos de acesso decorrentes do modelo.

No fim das contas, a conclusão do modelo estático é que, sob livre acesso, a exploração do recurso é maior do que sob o acesso privado. A incerteza sobre a definição de direitos de propriedade afeta o ritmo de extração na medida em que, como mostrado no modelo estático de acesso livre, os agentes procuram ingressar na atividade de extração do recurso renovável enquanto o lucro econômico é maior do que zero. Nesse caso, não há incentivos para o "investimento" em estoque por parte de um produtor, já que qualquer outro agente pode se apropriar deste estoque.

Tabela 5.1: Soluções analíticas para o equilíbrio bioeconômico no modelo estático - livre acesso e acesso privado

	Livre Acesso	Acesso Privado
Equilíbrio Biológico	$G(S) = H(E, S)$	$G(S) = H(E, S)$
Equilíbrio Econômico	$\pi(E, S) = 0$	Max $\pi(E, S) \Rightarrow R_{mg} = C_{mg}$
Estoque (S)	$S_{livre}^* = \frac{w}{Pe}$	$S_{privado}^* = \frac{1}{2} \frac{PeS_{max} + w}{Pe}$
Esforço (E)	$E_{livre}^* = \frac{g}{e} \left(1 - \frac{w}{PeS_{max}}\right)$	$E_{privado}^* = \frac{1}{2} \frac{g}{e} \left(1 - \frac{w}{PeS_{max}}\right)$
Produção ($H(E, S)$)	$H_{livre}^* = \frac{gw}{Pe} \left(1 - \frac{w}{PeS_{max}}\right)$	$H_{privado}^* = \frac{1}{4} g \left(S_{max} - \frac{w^2}{P^2 e^2 S_{max}}\right)$

Ao passo que, no acesso privado, o agente produtor maximiza seu lucro diminuindo a quantidade produzida até que seu custo marginal seja igual a sua receita marginal. Com o direito de propriedade definido, o agente produtor do recurso natural renovável irá explorá-lo até que a receita gerada pela produção de uma unidade adicional se iguale ao custo de produzir tal unidade adicional. Na prática, esta situação faz com que a quantidade extraída seja menor do que no modelo de livre acesso.

A figura 5.4 representa graficamente esta conclusão entre os equilíbrios distintos sob livre acesso e acesso privado. Dado que a extração é maior, o livre acesso conduz a um menor nível de estoque, maior esforço de produção e a extração geralmente menor (mas esta última conclusão depende dos parâmetros do modelo) quando comparado com o modelo sob acesso privado. É claro que a quantidade final a ser extraída dependerá dos custos e receitas da atividade. A exaustão do recurso é mais provável no acesso livre, embora não aconteça necessariamente, porque o estoque estabiliza em um patamar menor.

Críticas ao Modelo Estático

O estado estacionário é um constructo mental adequado para organizar ideias, porém sua aplicação à vida real não pode ser levada à risca. Isso porque a dinâmica das populações de recursos renováveis (peixes, por exemplo) está mais associada a um estado de permanente desequilíbrio, no qual condições estão mudando continuamente. De forma que, para algumas análises sobre a exploração de recursos naturais renováveis é mais importante investigar a dinâmica do processo de mudança do que propriamente o estado estacionário. Algumas espécies, por exemplo, são migratórias o que reduz o sentido do estado estacionário.

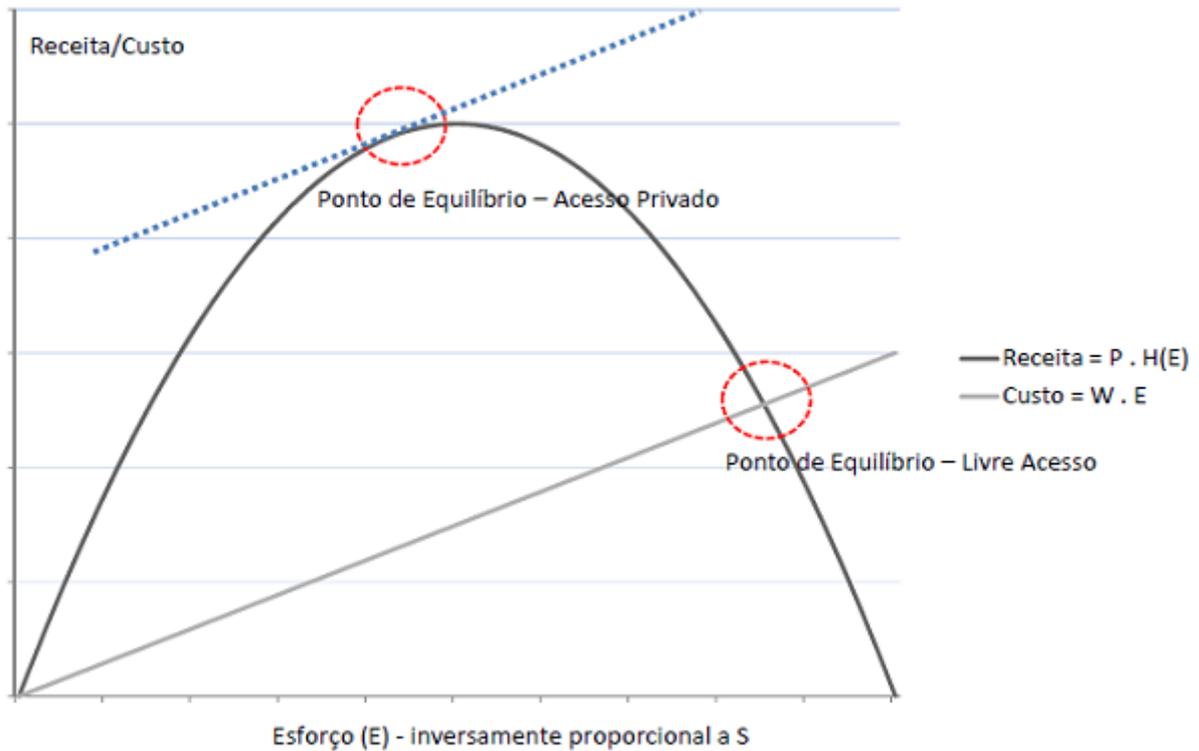


Figura 5.4: Equilíbrios Bioeconômicos no Modelo Estático - Acesso Privado e Livre Acesso

Além, o estado estacionário trata de uma regra de origem biológica válida para uma espécie isolada e de comportamento padrão, não considerando a interação entre espécies. As espécies ligadas entre si ou as espécies com grandes variações naturais não podem ser submetidas a uma exploração baseada na análise da taxa de reposição. Também, o estado estacionário não faz uma consideração sobre a influência da aleatoriedade no crescimento populacional das espécies. O modelo não considera clima, sazonalidades, qualidade dos recursos, eventos adversos esporádicos que podem conduzir a extinção. Não inclui incertezas biológicas tais como a definição do S_{min} , (estoque mínimo que mantém a sustentabilidade do ecossistema), S_{max} e taxas de reposição.

Ademais, há que se considerar a inflexibilidade dos meios de produção que podem atrasar ou criar dificuldades para a adequação do esforço de extração no caminho para o equilíbrio bioeconômico. Se oscilações na trajetória para o estado estacionário forem de grande amplitude, pode-se conduzir a uma exaustão do recurso antes de atingir o equilíbrio. Por todas estas considerações, a utilidade do modelo estático diminui e o estado estacionário pode não ocorrer na prática.

5.3.2 Modelo VPL Máximo

Para o caso de um produtor único e privado de recursos naturais renováveis, constrói-se o modelo de VPL (Valor Presente Líquido) Máximo, no qual este agente racional com o direito de propriedade busca maximizar o valor presente da exploração dos recursos renováveis. Este modelo é uma generalização do modelo estático de exploração de recurso renovável com acesso privado, agora incluindo a avaliação intertemporal na análise. Com isso, o modelo VPL Máximo é dado pela maximização do bem-estar intertemporal decorrente da exploração do recurso, tendo como variável de decisão a quantidade de produção em cada período, representada por H_t .

O agente produtor é considerado como tomador de preço em um mercado competitivo e o problema se resume a maximizar intertemporalmente o lucro do produtor conforme abaixo:

$$\text{Maximizar}_{H_t} \quad \pi = \int_{t=0}^{t=\infty} \{PH_t - C(H_t, S_t)\}e^{-it} dt \quad (5.9)$$

Sujeito a:

$$\frac{dS}{dt} = G(S_t) - H_t \quad (5.10)$$

Como no modelo estático, o preço de mercado P é contante e dado de forma exógena. A taxa de desconto é representada por i . O estoque inicial é conhecido com $S(0) = S_0$. A restrição 5.10 indica que variação de estoque é dada pela diferença entre taxa de crescimento e taxa de produção em cada período. O custo no tempo t (C_t) é função da quantidade produzida (H_t) e do tamanho do estoque (S_t). Além disso, o custo depende positivamente da quantidade produzida e negativamente do estoque. Assim,

$$C_t = C(H_t, S_t) \quad \text{com} \quad \frac{\partial C(H_t, S_t)}{\partial H} > 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial C(H_t, S_t)}{\partial S} < 0$$

O dilema intertemporal do proprietário da fonte de recursos renováveis consiste exatamente em determinar o ritmo de extração que maximiza o seu VPL. O produtor pode investir em estoque, esperando para produzir em um tempo posterior ou pode explorar uma fração maior do recurso hoje.

Investir em estoque tem implicações na taxa de crescimento do estoque nos períodos subsequentes e no custo de produção. Quando o nível de estoque está abaixo de S_{MSY} indicado na figura 5.3, mais estoque significa aumento na taxa de crescimento e, quando acima de S_{MSY} , significa diminuição na taxa de crescimento do estoque. O aumento do estoque também possui impacto no custo de produção porque, para níveis maiores de estoque, supõe-se que menos esforço (e, portanto, menos custo) é empregado para explorar o recurso.

O investimento em estoque é visto, portanto, como um investimento em capital, de forma que o estoque de equilíbrio é aquele para o qual o retorno do investimento em estoque é igual ao retorno de investimentos alternativos. Assim, caso o custo marginal de se investir em estoque seja menor do que o benefício marginal de se investir em estoque, o produtor investirá no estoque. Caso contrário, o produtor não investirá em estoque. O resultado de equilíbrio ocorre quando custo marginal de se investir em estoque se iguala ao seu benefício marginal.

Em termos matemáticos, temos que o custo marginal de se investir em estoque, digamos C_{MgS} , é:

$$C_{MgS} = ip_t \quad (5.11)$$

Aqui, p_t é o preço sombra ou líquido do recurso e pode ser entendido como a contribuição para o lucro do produtor dada por uma unidade adicional de estoque do recurso. Assim, p_t é calculado a partir do preço de mercado P descontando-se o custo marginal de produção decorrente da extração de uma unidade adicional do recurso. Assim,

$$p_t = P - \frac{\partial C(H, S)}{\partial H_t}$$

Duas características de p_t que se destacam: p_t não é observável e varia no tempo, a menos quando o nível de produção é tal que o estado estacionário é atingido (PERMAN *et al.* [3]).

Já o benefício marginal do investimento em estoque, digamos B_{MgS} , é calculado como a soma de duas parcelas:

$$B_{MgS} = p_t \frac{dG(S)}{dS_t} - \frac{\partial C(H, S)}{\partial S_t} \quad (5.12)$$

A primeira parcela refere-se ao impacto (positivo ou negativo) de uma unidade adicional de estoque na função crescimento do estoque. O benefício marginal do crescimento de estoque é calculado, então, multiplicando-se pelo preço líquido p_t . A segunda parcela refere-se ao custo marginal decorrente de uma unidade adicional no estoque. Por hipótese, a função custo depende negativamente do estoque, de forma que a segunda parcela tem valor negativo, o que explica o sinal negativo no cálculo do benefício marginal do investimento em estoque.

Uma vez que estão calculados os benefício e custo marginais do investimento em estoque, a decisão passa pela comparação entre estas duas medidas. Se $B_{MgS} > C_{MgS} \Rightarrow$ o produtor investe em estoque. Se $B_{MgS} < C_{MgS} \Rightarrow$ o produtor não investe em estoque. O resultado de equilíbrio é aquele para o qual $B_{MgS} = C_{MgS}$, nestas condições o VPL é máximo.

Dessa maneira, igualando as equações 5.11 e 5.12, e dividindo ambos os lados pelo preço líquido p_t , temos:

$$i = \frac{dG(S)}{dS_t} - \frac{\frac{\partial C(H,S)}{\partial S_t}}{p_t} \quad (5.13)$$

O lado esquerdo da equação 5.13 corresponde à taxa de retorno de mercado que pode ser obtida em investimentos alternativos. O lado direito é a taxa de retorno obtida com a exploração do recurso natural renovável, sendo composta de duas parcelas. A primeira corresponde à taxa de crescimento do estoque e a segunda é equivalente ao valor da redução nos custos de extração decorrente de uma unidade adicional em estoque.

Se não há influência do nível de estoque no custo de extração, só há incentivos para o investimento em estoque por parte do produtor enquanto a taxa de desconto aplicada, i , é menor do que a taxa de crescimento. De outra maneira, seria mais interessante para o produtor explorar o recurso agora e aplicar o resultado da venda deste recurso em investimentos alternativos. Assim, nestas condições o resultado ótimo é aquele para o qual $i = \frac{dG(S)}{dS_t}$, quando a taxa de desconto iguala a taxa de crescimento do estoque.

Quando há influência do nível de estoque no custo de extração, há duas parcelas no benefício marginal do investimento em estoque: aquela relacionada à receita decorrente do aumento da taxa de crescimento do estoque e aquela relacionada à receita decorrente da queda no custo de extração. Nessas condições, dado que por hipótese o custo de extração sempre cai com o aumento do estoque, o produtor tem mais incentivos para investir em estoque. O nível de estoque ótimo será, portanto, maior.

5.3.3 Comparando os Modelos Estático e VPL Máximo para Exploração de Recursos Renováveis

O modelo VPL Máximo para exploração de recursos renováveis é uma generalização do modelo estático de exploração de recurso renovável com acesso privado, agora incluindo a avaliação intertemporal na análise. Assim, dependendo da taxa de desconto aplicada, o modelo VPL Máximo pode se aproximar mais do estático com acesso privado ou do estático com livre acesso. Se $i = 0$, o VPL Máximo é equivalente ao modelo estático de acesso privado.

A medida que i cresce, a solução ótima do modelo VPL Máximo se afasta do modelo estático com acesso privado em direção à situação de equilíbrio do modelo estático com acesso livre. Isso porque com o i grande, não vale a pena para o produtor investir em estoque, o que é exatamente a mesma condição do acesso livre. De fato, se i é muito grande, o custo marginal de se investir em estoque será maior do que a receita marginal de se investir em estoque, de forma que o produtor não

investirá em estoque.

Assim, o estoque ótimo no modelo VPL Máximo fica em um ponto entre o estoque do estático de acesso privado e do estático de livre acesso. Finalmente, o modelo de exploração privada VPL (dinâmico) levará ao ótimo social se a taxa de desconto utilizada é a taxa de desconto social, se não há externalidades e se há concorrência perfeita.

Agora que fizemos considerações sobre a teoria econômica que trata da exploração de recursos naturais renováveis e não renováveis, seguiremos na próxima seção para investigar o campo da economia que trata da poluição. Isso é conveniente pois muitos problemas ambientais não decorrem exclusivamente da exploração de recursos naturais, mas da poluição emitida a partir da produção econômica. Este ramo da economia é chamado de economia da poluição.

5.4 Economia da Poluição

5.4.1 Nível Ótimo de Poluição

A poluição pode ser considerada uma externalidade negativa quando a atividade de um agente causa perda de bem-estar para outro agente sem que haja uma compensação para a perda de tal bem-estar. Assim, está criado um custo externo e o agente poluidor, que não oferece nenhuma compensação, continua a poluir e diminuir o bem-estar do outro agente considerando este efeito irrelevante para ele.

A definição econômica de poluição é dependente do efeito físico da poluição e da reação humana a este efeito físico (PEARCE e TURNER [42]). A pura existência da poluição física não significa que a poluição econômica existe. Nesse sentido, a poluição física ao ocasionar uma perda de bem-estar, e somente quando ocasiona esta perda, é considerada poluição econômica.

A economia da poluição, considerando a definição de poluição econômica, procura responder aos seguintes questionamentos: inicialmente, quanto a sociedade "almeja" de poluição? A resposta a esta primeira pergunta não é necessariamente zero, tendo em que vista que a produção gera benefícios para a sociedade embora também gere custos ambientais. É possível que a sociedade tolere algum nível de poluição decorrente da produção econômica por conta do benefício gerado. Então, passa a ser importante medir quanto estes benefícios compensam os seus custos ambientais. O segundo questionamento que a economia da poluição procura responder é: como fazer para alcançar o quanto a sociedade "quer" de poluição? Assim, a economia da poluição estuda e propõe ferramentas para conduzir o mercado de bens e serviços para um nível de produção que corresponda ao nível de poluição que a sociedade almeja. O terceiro questionamento que a economia da poluição se propõe a respon-

der é: como fazer a condução do mercado ao nível ótimo de poluição com o menor custo para a sociedade? Trata, portanto, da eficiência e eficácia de instrumentos a serem aplicados ao mercado - tais como taxas, subsídios, padrões ambientais, entre outros - para atingir os objetivos a que se propõem.

Para analisar e propor soluções aos problemas ambientais relacionados à poluição, de forma geral, a economia da poluição procura internalizar a externalidade negativa decorrente da poluição. Isto é, se a perda de bem-estar é compensada pelo agente poluidor, o efeito da poluição é internalizado e passa a ser considerado para a tomada de decisões econômicas.

Nesse sentido, o nível ótimo de poluição econômica decorre de uma análise marginal do benefício privado líquido e do custo externo (externalidade). O poluidor incorrerá em custos para a produção do bem que irá aumentar a poluição, mas também receberá benefícios em forma de receita. A diferença entre sua receita e seus custos é o benefício privado líquido. O Benefício Privado Marginal Líquido ($B_{Mg}PL$) é a versão marginal do benefício privado líquido, isto é, o benefício privado líquido extra proporcionado pelo aumento de uma unidade no nível de produção. O $B_{Mg}PL$ é tido como decrescente com o nível de produção. O custo externo marginal ($C_{Mg}E$) é o valor do custo extra provocado pela poluição decorrente da produção de uma unidade adicional no nível de produção Q . O $C_{Mg}E$ é considerado nesta análise como crescente, isto é, quanto maior o nível de produção Q , maior o $C_{Mg}E$. O nível ótimo de externalidade, ou poluição econômica, é exatamente quando $B_{Mg}PL = C_{Mg}E$ (PEARCE e TURNER [42]), como exibido na figura 5.5. Isso porque o objetivo da sociedade pode ser traduzido como a maximização da soma de benefícios menos a soma dos custos - aqui lembrando que a produção gera bem-estar para a sociedade. Dado que a análise é marginal, os benefícios e os custos totais são representados pelas áreas abaixo dos gráficos $B_{Mg}PL$ e $C_{Mg}E$, respectivamente. Assim, o ponto que maximiza as áreas abaixo do $B_{Mg}PL$ menos a de abaixo do $C_{Mg}E$ é exatamente o nível de produção Q^* para o qual $B_{Mg}PL = C_{Mg}E$.

Conforme se depreende desta análise, na presença da externalidade, há uma diferença entre os custos privado e social. E se esta divergência não for corrigida o poluidor irá continuar a operar até atingir o ponto Q_π , como na figura 5.5, pois nesse nível de produção seu benefício privado líquido é máximo. A economia da poluição trata, portanto, da proposição de instrumentos para conduzir o mercado ao ponto Q^* .

5.4.2 Teorema de Coase

Alguns economistas acreditam que existe no mercado um potencial de barganha entre os agentes causadores da poluição e aqueles afetados pela poluição que condu-

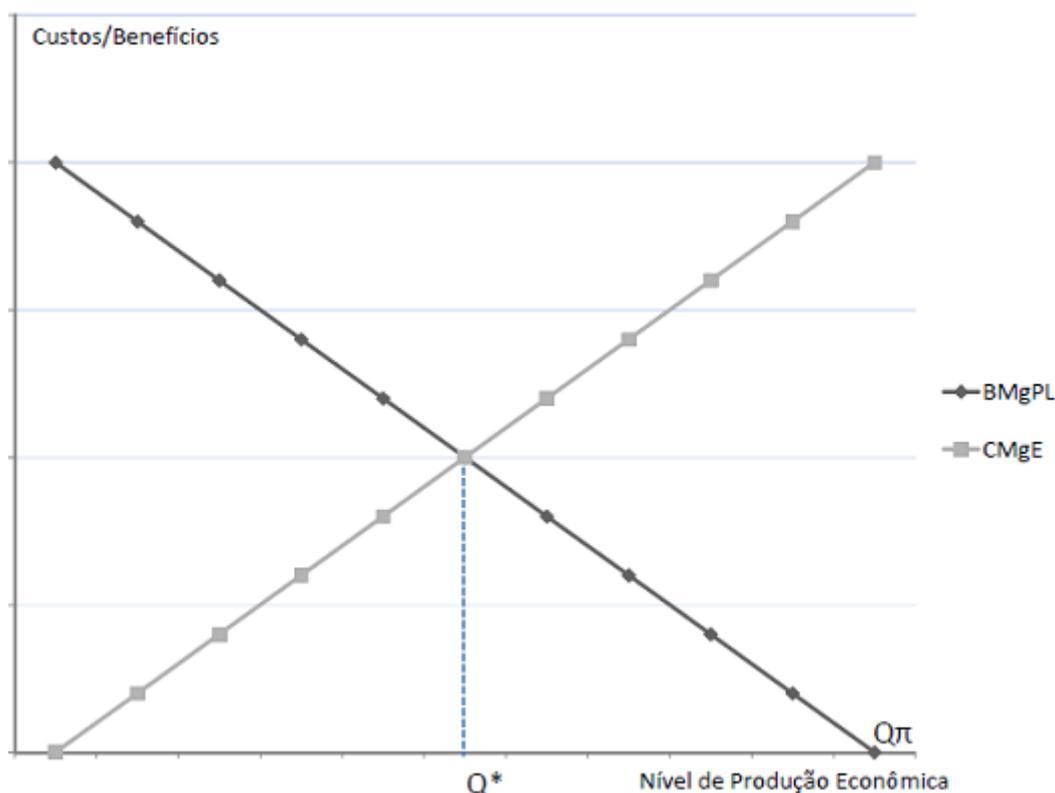


Figura 5.5: Nível Ótimo de Poluição ocorre quando $B_{MgPL} = C_{MgE}$, no qual o nível de produção econômica é Q^*

ziria o mercado naturalmente ao ótimo social Q^* . Este resultado é conhecido como o Teorema de Coase, o qual é baseado no seguinte argumento: sendo o direito de propriedade do poluidor, inicialmente este agente irá operar no nível Q_π , situação na qual seu lucro é máximo. No entanto, estabelecendo-se uma barganha entre o agente poluidor e o que sofre a poluição, no nível de produção Q_π o agente que sofre a externalidade poderá oferecer ao agente poluidor uma compensação para que ele deixe de poluir até um nível, digamos, $Q_1 < Q_\pi$. Isso acontece porque o custo externo marginal (C_{MgE}) é maior do que o benefício privado marginal líquido (B_{MgPL}) em Q_π . Esta mesma dinâmica pode ocorrer até o ponto Q^* , enquanto $B_{MgPL} < C_{MgE}$.

Alternativamente, se o direito de propriedade é do agente que sofre a externalidade, inicialmente não haveria produção nem poluição econômica, sendo a origem o ponto inicial. No entanto, o poluidor pode oferecer uma compensação ao agente que sofre a externalidade porque seu benefício privado marginal líquido é maior do que o custo externo marginal. Assim, o produtor irá produzir até um nível de produção, digamos, $Q_2 > 0$. Esta dinâmica pode ocorrer enquanto $B_{MgPL} > C_{MgE}$, isto é, até Q^* . Assim, segundo o Teorema de Coase, não importando quem possui o direito de propriedade, estabelecendo-se uma barganha entre o agente poluidor e o

que sofre a externalidade, o mercado conduziria ao ótimo social Q^* . Nesse sentido, não haveria a necessidade de regulação do governo sobre a externalidade, uma vez que o mercado por si só tenderia ao ótimo social.

Críticas ao Teorema de Coase

O Teorema de Coase assume que o mercado está em concorrência perfeita, caso contrário, a solução de barganha não seria atingida. Em concorrência imperfeita, a receita marginal do produtor não é igual ao preço de mercado, isto é, o produtor pode ter a capacidade de influenciar os preços praticados. Assim, os críticos do Teorema de Coase apontam para o fato de que, na prática, há poucos mercados em concorrência perfeita, o que inviabilizaria a sua aplicação na maior parte dos casos reais.

De fato, não há muitos exemplos de barganha acontecendo no mundo real. Isso porque há obstáculos para que a barganha aconteça de fato, os chamados custos de transação. Os custos de transação incluem os custos de reunir as partes, de identificar os agentes que sofrem a externalidade e a própria oportunidade de barganha em si. Se os custos de transação são tão grandes a ponto de serem maiores do que o benefício esperado pela barganha, então a barganha sequer começará (PEARCE e TURNER [42]).

Identificar as partes interessadas na barganha (agente poluidor e o que sofre a poluição) e a própria oportunidade da barganha, em geral, é muito difícil porque:

- Muitos poluentes ficam no ambiente por longos períodos - tais como químicos tóxicos, lixo radioativo, depleção da camada de ozônio, poluição da atmosfera com gás carbônico - e parte das pessoas que serão afetadas pela poluição podem ainda sequer ter nascido, as futuras gerações. Esta condição praticamente inviabiliza a barganha.
- Para os casos de recursos com acesso livre, geralmente, não está claro quem barganhará com quem uma vez que não há incentivos para os agentes em promover a redução do acesso ao recurso. Neste caso, cada indivíduo usuário do recurso de propriedade comum é o poluidor e, ao mesmo tempo, aquele que sofre os efeitos da poluição.
- Por vezes, os agentes podem não saber a origem da poluição ou mesmo não saber o prejuízo que tal nível de poluição lhes causa. Este é geralmente o caso de poluição do ar e das águas. Os custos de geração destas informações devem, portanto, ser acrescentados aos custos de transação.

Outro problema com a solução da barganha é que ela oferece a oportunidade de se fazer da própria barganha uma atividade econômica (*threat-making*). Se um agente

que sofre com o dano decorrente da poluição compensa um produtor, está aberto o caminho para que outros agentes demandem a mesma compensação mesmo que inicialmente não tivessem a intenção de poluir. Por exemplo, proprietários de terra com florestas podem ameaçar o desmatamento para produção agrícola, ainda que não tenham verdadeiramente esta intenção, apenas para receber uma compensação que, digamos, o governo paga para aqueles que mantêm a floresta intacta.

5.4.3 Papel do Governo

Conforme ressaltado acima, sem considerar a externalidade da poluição, o ponto de produção que maximiza o lucro do produtor é Q_π . O ponto ótimo social considerando o custo externo da poluição provocado pela produção é Q^* , com $Q^* < Q_\pi$. Assim, para se perseguir o nível ótimo de produção e, conseqüentemente, de poluição, há duas possibilidades: solução sem intervenção governamental (Teorema de Coase com barganha entre as partes) e solução com intervenção governamental. Na visão de muitos economistas da poluição, diante das falhas de mercado, o governo deve procurar corrigi-las e, para tanto, pode usar diversos instrumentos de incentivos aos agentes, desde legislação direta à instauração de taxas e subsídios.

De forma geral, o governo pode usar instrumentos de comando e controle - caracterizados por intervenções diretas no mercado, regras, regulação proibitiva, limitadora e que estabelece o comportamento a ser seguido - e os instrumentos de incentivos econômicos - tais como taxas e subsídios, permissões e certificados transacionáveis. Nenhum instrumento é adequado para todos os mercados ou tipos de poluição, de forma que os instrumentos são analisados sob diversos critérios tais como: custo-efetividade, efeitos de longo prazo, flexibilidade, entre outros. A seguir, serão ressaltadas características de alguns instrumentos disponíveis.

5.4.4 Taxação Pigouviana

Taxa pigouviana, proposta originalmente pelo economista britânico Arthur C. Pigou, é um tributo aplicado a uma atividade de mercado que esteja produzindo externalidades negativas. Esta regulação pode ocorrer por meio de uma taxa sobre a produção, a ser calculada em função do dano estimado decorrente da produção.

Se a taxa, digamos t , é estabelecida por unidade de produto, o seu efeito é o de transladar toda a curva do $B_{Mg}PL$ exatamente no valor de t . Se este valor de t é igual ao $C_{Mg}E$ no ponto ótimo de produção, o produtor irá maximizar seu benefício privado líquido exatamente ao nível de produção Q^* , como mostra a figura 5.6. Nesse sentido, a aplicação da taxa, com valor equivalente ao custo marginal externo no nível de produção ótimo Q^* , conduz o produtor à produzir exatamente a quantidade ótima. E, nesse caso, a taxa é então chamada t^* , taxa pigouviana ótima.

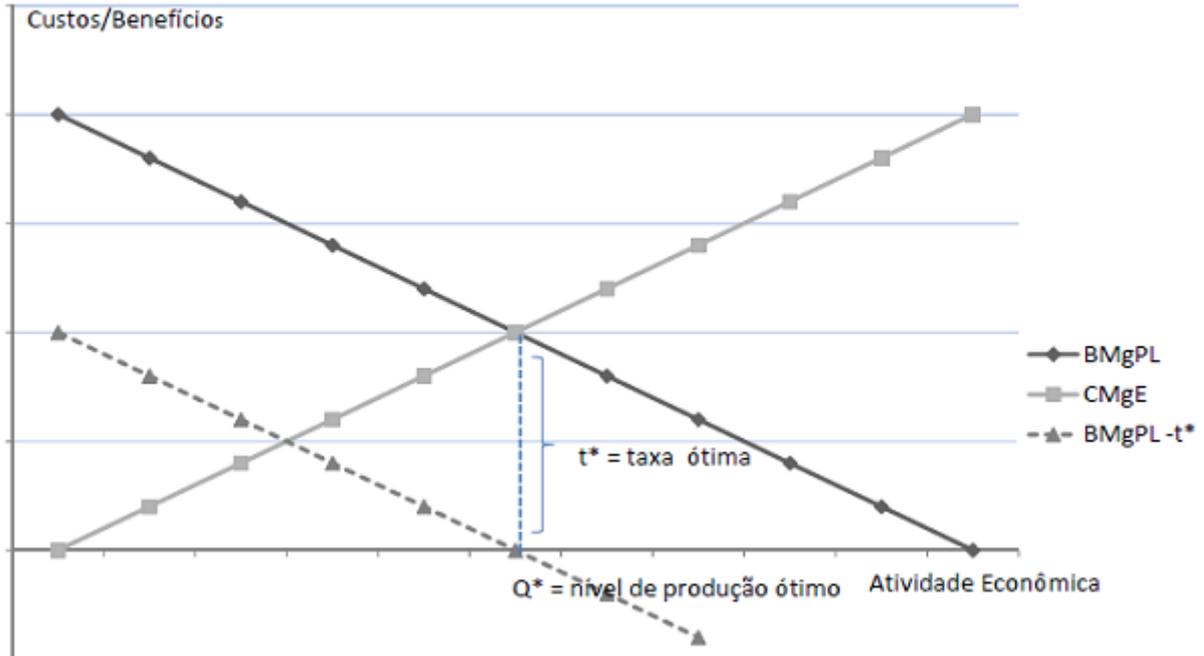


Figura 5.6: Determinação da taxa ótima

A ideia é que o imposto (taxa pigouviana) acrescenta o custo do dano ambiental que, caso contrário, não seria precificado. Uma vantagem da instauração da taxa quando aplicada sobre a quantidade de poluição emitida é que a sua inclusão estimula os agentes a investirem em equipamentos e/ou tecnologias de abatimento da poluição. Exemplos de equipamentos que diminuem as emissões de poluentes são estações de tratamento de esgotos diversos e filtros nas emissões de gases à atmosfera. Dessa maneira, o poluidor pode perseguir a diminuição do nível de poluição não somente ajustando a quantidade produzida, mas também investindo em tecnologias de abatimento.

Com o custo marginal de abatimento (C_{MgA}), é possível realizar uma análise similar à do benefício privado marginal líquido. O custo marginal de abatimento corresponde ao custo extra da redução no nível de poluição emitida com o investimento em tecnologias de abatimento (PEARCE e TURNER [42]). Assim como a curva do B_{MgPL} , a curva do C_{MgA} é negativamente inclinada, como indicado na figura 5.7. Esta característica é intuitiva, tendo em vista que abater uma quantidade inicial maior de poluição geralmente é menos custoso. A medida que se queira reduzir ainda mais a poluição, é necessário utilizar outras tecnologias de abatimento cada vez mais sofisticadas e dispendiosas. Dessa forma, quanto menor o nível de poluição que se objetiva, maior o custo marginal de abatimento.

Pela análise do custo de abatimento marginal, a taxa ótima é aquela para a qual $C_{MgA} = C_{MgE}$, como indicado na figura 5.7. Isso acontece porque, enquanto $C_{MgA} < C_{MgE}$ é mais vantajoso para a sociedade que a poluição seja abatida.

Caso contrário ($C_{MgA} > C_{MgE}$), os custos de abatimentos mais do que compensam a redução dos custos externos.

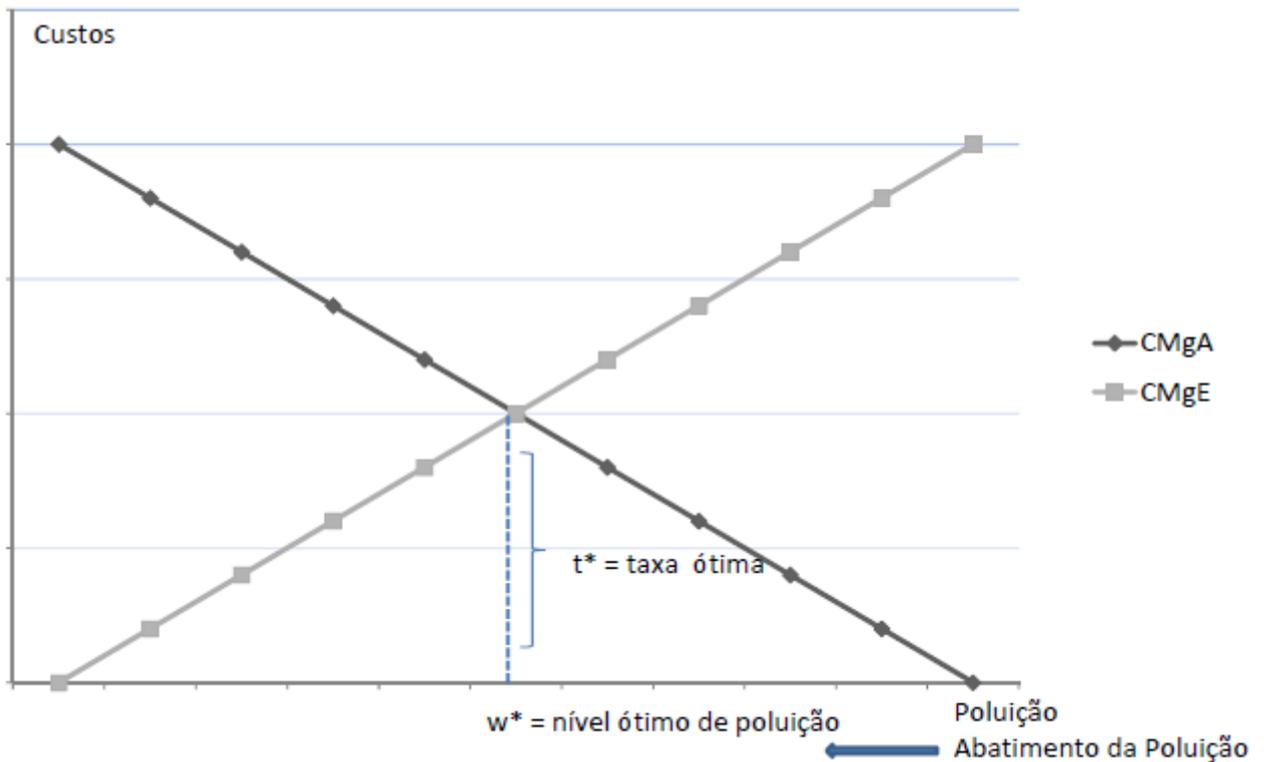


Figura 5.7: Determinação da taxa ótima por meio da análise do custo marginal de abatimento

Na verdade, o abatimento da poluição emitida pelas empresas pode ser entendido como mais uma forma de atingir o nível de poluição ótima, para além da redução do nível de produção como revela a análise do B_{MgPL} (PEARCE e TURNER [42]). De fato, de maneira similar à análise do B_{MgPL} , um empresa poluidora irá decidir abater seu nível de poluição sempre que $C_{MgA} < B_{MgPL}$. Isto quer dizer que, enquanto $C_{MgA} < B_{MgPL}$, é mais barato para empresa abater do que reduzir a produção. A partir do ponto em que $C_{MgA} > B_{MgPL}$, é mais adequado para a empresa reagir à imposição da taxa reduzindo a sua produção.

Por possuírem domínio tecnológico ou práticas de produção distintos, empresas diferentes podem possuir custos de abatimentos marginais díspares entre si. A aplicação de uma taxa sobre a poluição possui eficiência dinâmica ao não estabelecer o nível de poluição (como no caso da definição de um padrão ambiental, por exemplo) para cada uma das empresas, deixando a cargo dos poluidores maximizarem a sua produção de acordo com os seus custos de abatimentos individuais. Isso incentiva as empresas a sempre buscarem abater mais poluição, com maiores investimentos para adoção de novas tecnologias e inovações. Dessa maneira, a taxa é uma intervenção no mercado que é custo-efetiva. Por exemplo, a definição de um padrão ambiental

para todas as empresas indiscriminadamente tem maior custo para as empresas atingindo o mesmo resultado em termos de abatimento da poluição quando comparada com a taxaço. Isso acontece porque, no caso da taxa, as empresas que possuem menor custo de abatimento da poluição abatem mais do que aquelas com maior custo de abatimento. Assim, a taxaço atinge os mesmos resultados em termos de abatimento custando menos no agregado para as empresas do que a regulaço pelo padrõ ambiental. Adicionalmente, a taxaço também possui alguma flexibilidade e pode ser variada para refletir escassez crescente dos serviços ambientais.

Finalmente, se o benefício privado e os custos externos são conhecidos, pode-se calcular a taxa ótima. Porém, a principal dificuldade para aplicaço da taxa pigouviana é que é necessário conhecer as curvas de $C_{Mg}E$ e $B_{Mg}PL$ a fim de determinar a taxa que conduz ao ótimo social. Há desafios grandes em estimar a $C_{Mg}E$ porque é necessário conhecer a função que estabelece quanto o custo externo varia de acordo com a quantidade de poluição emitida e há muita incerteza nesta estimativa (PEARCE e TURNER [42]). Ademais, em relação à curva de benefício privado marginal líquido ($B_{Mg}PL$), quando o poluidor é uma firma, por conta da confidencialidade comercial, também pode ser difícil de estimá-la. Na prática, os governos possuem muitas limitações para obter boas estimativas das curvas $C_{Mg}E$ e $B_{Mg}PL$.

Adicionalmente, há grande resistências das indústrias para a adoço de taxas pelo governo. De forma geral, as empresas, então, tendem a fazer *lobby* no sentido de evitar a taxaço. Com a aplicaço da taxa, as empresas deixam de produzir a quantidade Q_π para produzir a quantidade Q^* , perdendo o benefício das unidades entre Q^* e Q_π . Mesmo operando na quantidade ótima Q^* , a empresa ainda paga a taxa sobre tais unidades. Assim, alguns economistas questionam se a aplicaço da taxa é justa.

Por fim, é importante observar que quando a poluição é muito danosa e indesejada, a aplicaço de uma taxa pode não ser a melhor escolha para regular o mercado, muitas vezes sendo mais indicado estabelecer um padrõ ambiental, por exemplo, e proibir a poluição diretamente.

5.4.5 Certificados Negociáveis de Emissões

O instrumento certificados negociáveis de emissões funciona com o estabelecimento de um limite total de emissões como um instrumento de comando e controle. No entanto, além do estabelecimento do limite total de emissão também são distribuídos certificados de poluição entre as firmas poluentes para o nível de poluição permitido. Há também a criação de um mercado de certificados no qual as empresas podem comprá-los ou vendê-los.

Assim, as empresas que queiram poluir além de seu limite têm a opção de comprar novos certificados de outras empresas que, por exemplo, abateram parte de suas emissões. Nesse sentido, sempre que o custo marginal de abatimento de uma empresa for menor que o preço do certificado, será mais vantajoso para a poluente abater ao invés de comprar novos certificados. Caso contrário, seria mais vantajoso comprar certificados. Dessa maneira, a curva de custo marginal de abatimento corresponde à curva de demanda dos certificados. O preço ótimo dos certificados é aquele para o qual o custo marginal de abatimento se iguala ao custo externo marginal ($C_{Mg}A = C_{Mg}E$). Isto é, o governo deveria emitir uma quantidade de certificados tal, digamos Q_{tde}^* , para a qual o preço dos certificados negociáveis é igual a p^* , e isso acontece quando $C_{Mg}A = C_{Mg}E$.

A seguir são destacadas algumas das vantagens dos certificados negociáveis. Inicialmente, destaca-se que são custo-eficientes. Isto é, poluidores com menores custos marginais de abatimento irão abater mais do que os poluidores com maior custo marginal de abatimento. Estes últimos, por sua vez, prefeririam comprar novos certificados antes dos primeiros. Assim, ambos se beneficiam do custo marginal de abatimento menor, um vendendo o certificado e outro comprando. O resultado final é que os certificados são custo-eficientes.

Na ocasião de novos entrantes poluidores, mantendo-se a quantidade de certificados disponíveis no mercado, o preço dos certificados aumenta e o nível de poluição é mantido como antes. No entanto, caso o governo queira aumentar o nível de poluição, basta aumentar o número de certificados disponíveis. Caso queira diminuir o nível de poluição, pode comprar os certificados disponíveis no mercado. Assim, os certificados oferecem flexibilidade na alteração dos níveis de poluição.

Outra característica interessante é que os certificados criam oportunidades para não-poluidores participarem do mercado de certificados, comprando-os e não poluindo e, com isso, diminuindo o nível geral de poluição.

Os preços negociados no mercado de certificados já embutem a inflação, não sendo necessário ao governo ajustar estes preços assim como no caso da taxa, por exemplo. Além disso, os certificados possuem eficiência dinâmica ao não estabelecer o nível de poluição (como no caso da definição de um padrão ambiental) para cada uma das empresas, deixando a cargo das empresas poluidoras maximizarem a sua produção de acordo com os seus custos de abatimentos individuais. Isso incentiva as empresas a sempre buscarem o aumento do abatimento, isto é, buscam a eficiência dinâmica.

A seguir são destacadas algumas das desvantagens dos certificados negociáveis. Os custos de transação dos certificados são relativamente altos. É necessário estabelecer um conjunto de instituições que são responsáveis pela emissão e ambiente de negociação destes certificados, o que é caro quando comparado a outros instru-

mentos. Além disso, pode haver imperfeições no mercado de certificados, o que prejudica o funcionamento do instrumento inclusive com volatilidade de preços. A volatilidade de preços não é desejável porque dificulta o planejamento por parte das empresas, dificultando o processo decisório de produção e investimento em tecnologias de abatimento.

Outra desvantagem dos certificados é que eles demandam uma legislação muito mais complexa para sua operação quando comparada com a taxa, por exemplo. Empresas já no mercado podem se recusar a vender certificados para novo entrantes, como um exercício de poder de mercado. Inclusive, pode haver mercados de certificados com baixa liquidez com um número pequeno de vendedores e compradores.

5.4.6 Subsídios

A ideia central nos subsídios é oferecer pagamentos a empresas que poluam abaixo de um certo nível pré-determinado como uma forma de estimular as empresas a reduzir o nível de poluição. Pelo menos no curto prazo, os subsídios são equivalentes à taxa, no entanto, mudando o sentido das transferências, agora do governo para as empresas.

No longo prazo, porém, os subsídios são muito criticados por, alegadamente, promoverem a redução do custo médio das empresas, atraindo com isso novos entrantes para o setor e aumentando a poluição total. No caso dos subsídios, no longo prazo, a produção total e a poluição podem aumentar por conta de novos entrantes, embora diminua para cada firma individualmente.

5.4.7 Critérios Para a Seleção de Instrumento de Regulação

Como comentado acima, nenhum instrumento é adequado para todos os mercados ou tipos de poluição, de forma que devem ser analisados sob diversos critérios para decidir qual deles é mais adequado em cada caso. Após, terem sido apresentados os embasamentos teóricos de alguns dos principais instrumentos da economia da poluição, nesta seção serão expostos alguns critérios para sua escolha na regulação da economia.

- **Custo-efetividade:** a redução é feita com o menor custo total para a sociedade? Por exemplo, no caso do estabelecimento de um padrão ambiental, este instrumento não é custo-efetivo por não considerar as diferentes curvas de custo marginal de abatimento das empresas. Instrumentos como taxa e certificados são custo-efetivos porque empresas com menor custo marginal de abatimento são estimuladas a reduzir mais suas emissões, enquanto as que possuem custo marginal de abatimento maior reduzem menos as emissões. O resultado final é que o custo total final da redução da poluição é menor.

- Custo de monitoramento e coerção: refere-se aos custos necessários para fiscalizar e garantir que as empresas cumpram a legislação imposta. Os custos de monitoramento e coerção podem ser relativamente grandes nos instrumentos de comando e controle, como é o caso do estabelecimento do padrão ambiental. O monitoramento e coerção são, em muitos casos, subfinanciados e, desta maneira, comprometem os objetivos da política.
- Efeitos de longo prazo como alteração do tamanho da indústria e eficiência dinâmica. Por exemplo, os subsídios, no longo prazo, têm o efeito de reduzir o custo médio das empresas e, assim, têm o potencial de atrair novos entrantes para o setor aumentando a poluição total no longo prazo. Para o caso das taxas, a redução da poluição é alcançada com redução de produção ou abateimento sem atrair novos entrantes por conta de sua aplicação. As taxas e os certificados são eficientes dinamicamente no sentido que criam incentivos para as empresas buscarem sempre reduzir o seus respectivos níveis de emissões. Já o padrão ambiental não estabelece esta necessidade de busca constante de redução de emissões.
- Poluentes com graves danos ambientais. Para o caso de graves danos ambientais, um instrumento de comando e controle é o mais indicado. Por exemplo, com a proibição do uso de matéria-prima específica, algum processo industrial muito poluente ou a obrigatoriedade da utilização de determinada tecnologia.
- Flexibilidade. Certificados negociáveis são bastante flexíveis. Por exemplo, na ocasião de novos entrantes poluidores no mercado, mantendo-se a quantidade de certificados disponíveis, o preço dos certificados aumenta e o nível de poluição é mantido como antes. Por outro lado, caso o governo queira aumentar o nível de poluição, basta aumentar o número de certificados disponíveis. Caso queira diminuir o nível de poluição, pode comprar os certificados disponíveis. Assim, os certificados oferecem flexibilidade na alteração dos níveis de poluição.

Feitas as observações acima a respeito da economia da poluição, a próxima seção trata de uma corrente de pensamento recente na teoria econômica que procura agregar elementos ecológicos e físicos à sua análise, a economia ecológica.

5.5 Economia Ecológica

Entre as críticas mais contundentes feitas ao modelo econômico atual figuram aquelas relacionadas à viabilidade ecológica de longo prazo do sistema capitalista frente a não consideração dos limites ecológicos do planeta na edificação da teoria econômica

ortodoxa ³. Em geral, os modelos econômicos são constituídos como sistemas fechados, isolados do meio externo. Sendo esta uma deficiência da teoria, já que os impactos decorrentes da atividade econômica no processo de elevação da temperatura média do planeta e no esgotamento dos recursos naturais são cada vez mais reconhecidos.

A partir da décadas de 1960 e 1970, com o desenvolvimento de uma consciência ambiental moderna, as questões ambientais passaram a ganhar cada vez mais importância. A própria teoria econômica passou a agregar elementos ecológicos - considerando aspectos como poluição, esgotamento de recursos naturais e a destruição dos ecossistemas - de uma maneira mais fundamental por uma de suas escolas de pensamento apenas a partir das décadas de 1960 e 1970, a chamada economia ecológica, que veio a consolidar-se como corrente no final da década de 1980 (FERNANDEZ [11]).

Como o capítulo 4 procurou mostrar, existe uma relação de complexidade entre os sistemas econômicos e os diversos ecossistemas do planeta, no sentido de que o meio ambiente fornece uma série de serviços que são, no fim das contas, responsáveis pelo sistema de suporte à vida em nosso planeta. Desta constatação é que se desenvolve a economia ecológica, que é fundamentalmente o estudo das relações entre os sistemas econômicos e ecológicos (COMMON e STAGL [2]).

Para os economistas ecológicos, a economia é vista como um subsistema aberto do planeta Terra que recolhe recursos naturais de baixa entropia e descarta resíduos de alta entropia. O cientista que primeiro estabeleceu a relação entre produção econômica e a segunda lei da termodinâmica e que, com isso, influenciou os fundamentos da economia ecológica, foi Georgescu-Roegen (GEORGESCU-ROEGEN [43]).

A segunda lei da termodinâmica afirma que, em qualquer processo termodinâmico fisicamente viável, a entropia de um sistema isolado não diminui. A entropia é muitas vezes entendida como uma medida de desordem (HINRICHS e KLEINBACH [26]), sendo que a origem de sua formulação está no estudo da eficiência de máquinas térmicas (STEWART [44]) e no estabelecimento de um limite teórico que impede que toda a energia térmica seja convertida em energia mecânica. Toda a transformação energética envolve produção de calor que tende a se dissipar e, com isso, aumentar a entropia do sistema. Dessa maneira, o processo de transformação energética é sempre irreversível, no sentido de que não é possível revertê-lo a condição inicial, na qual haveria exatamente a mesma quantidade de energia (a não ser me-

³A própria existência de uma ortodoxia econômica, no sentido de haver um conjunto de premissas e abordagem científica adotadas por um grande número de economistas, é por vezes questionada. Na visão de muitos economistas, no entanto, tais como NELSON e WINTER [38], existe uma corrente ortodoxa contemporânea que é algo imposta e é refletida na maioria dos livros-texto de economia.

diante a realização de trabalho externo). Este fato é uma evidência da segunda lei da termodinâmica.

Georgescu-Roegen, ao aplicar a segunda lei da termodinâmica à economia, afirmou que o processo econômico é um processo de trabalho sustentado por um fluxo de matéria e de energia de baixa entropia (energia capaz de realizar trabalho, tal como a contida nos combustíveis fósseis) provenientes do meio ambiente. A medida que os materiais e a energia são transformados em produção e consumo, rejeitos materiais e energia de alta entropia são descartados no ambiente. Adicionalmente, afirmou que sistemas que são abertos apenas para energia e não para matéria (como o planeta Terra) não podem funcionar indefinidamente também por uma impossibilidade termodinâmica (CLEVELAND e RUTH [45]). No fim das contas, reconhecia-se então os limites biofísicos à produção econômica.

Dessa maneira, agregando às análises econômicas elementos da ecologia e da termodinâmica, a economia ecológica reconhece os limites biofísicos do planeta Terra como obstáculos ao crescimento econômico (DALY [25]). Assim, a economia deveria ser reformada para garantir a sustentabilidade no longo prazo no sentido de:

1. limitar o uso de todos os recursos a taxas que resultem em níveis de poluição que podem ser assimilados pelos ecossistemas.
2. explorar recursos renováveis a taxas que não excedam a capacidade de reposição dos recursos.
3. explorar recursos não renováveis a taxas que, tanto quanto possível, não excedam a taxa de desenvolvimento de substitutos renováveis (DALY [1]).

Com as recomendações da economia ecológica, conclui-se aqui o capítulo sobre a economia do meio ambiente e da poluição. O capítulo 6 abordará os métodos de determinação do valor econômico de recursos naturais.

Capítulo 6

Valoração Ambiental: Métodos e Exemplos

6.1 Valoração Ambiental: O Que é?

Como exposto em detalhes na secção 5.1.2 do presente trabalho, o valor econômico dos recursos ambientais geralmente não é observável no mercado através de preços que reflitam seu custo de oportunidade. Isso acontece por conta de falhas de mercado. É importante destacar que em relação aos recursos naturais muitas vezes os direitos de propriedade não estão completamente definidos. Esta condição está na origem das falhas de mercado observadas: bens públicos e externalidades. Estas falhas, no fim das contas, impedem que o mercado e o seu sistema de preço seja adequado para definir um nível ótimo de consumo dos recursos naturais. Ademais, há muitos casos de bens e serviços ambientais para os quais sequer há mercado organizado, tais como ar limpo, regulação do clima ou controle de pestes. Ainda, grande parte dos custos de oportunidade ambientais recaem sobre as gerações futuras, no sentido que estas gerações podem se ver privadas de alguns dos serviços ambientais decorrentes do uso de recursos naturais não renováveis, por exemplo.

Diante de todas estas observações, são propostos diversos métodos com o objetivo de determinar o valor econômico de bens e serviços ambientais. O presente capítulo apresentará uma panorama dos métodos utilizados para valorar serviços ambientais. Inicialmente, destaca-se que determinar o valor econômico de um recurso ambiental é estimar o valor monetário deste em relação aos outros bens e serviços disponíveis na economia (MOTTA [39]). Com a valoração adequada é possível internalizar uma parte dos custos ambientais e, em última análise, permitir que as externalidades ambientais sejam consideradas nas decisões dos agentes econômicos. Este é o objetivo da valoração ambiental.

Aqui é importante definir o conceito de valor econômico total, em inglês TEV

- *total economic value* -, como a soma dos valores de todos os fluxos de serviços provenientes do estoque de capital natural agora e no futuro, avaliados no tempo presente (TEEB [46]). A ideia central é expressar o valor dos diferentes serviços ambientais em uma única unidade de medida, a moeda. De forma geral, a valoração é melhor aplicada para avaliação das consequências das mudanças no fluxo de serviços ambientais do que para estimar o valor total dos ecossistemas (TEEB [4]). Isso quer dizer que a análise ideal para valoração dos serviços ambientais deve ser feita com base nos efeitos das mudanças marginais em sua provisão.

Recursos naturais possuem valor econômico porque geram um fluxo de serviços diretos ou indiretos e, conseqüentemente, geram bem-estar. Os diversos ecossistemas da biosfera prestam serviços de suporte à vida tais como serviços de provisão, culturais, de controle e de suporte (ver a seção 3.2). É importante destacar que os serviços ambientais possuem custos, ainda que muitos deles sejam fornecidos sem *inputs* humanos. Nesta situação, todos os custos deveriam ser medidos como custos de oportunidade (TIETENBERG e LEWIS [47]). Os custos de oportunidade são mensurados levando-se em conta a produção ou consumo de bens e serviços que foram abdicados para a produção ou consumo de determinado bem ou serviço. No caso dos recursos naturais, os custos de oportunidade de usá-los para determinado fim equivalem aos benefícios líquidos dos serviços ambientais que não serão mais prestados.

6.2 Valoração Ambiental: Por Que Valorar?

Uma das críticas mais contundentes a respeito da proposição da valoração de bens e serviços ambientais é aquela que aponta a inadequação de se valorar algo que possui valor inestimável para a humanidade. Não obstante, os ecossistemas possuem valor intrínseco e utilitarista.

O valor intrínseco é aquele atribuído à própria existência do recurso natural, não havendo sentido ético em monetizá-lo dada sua característica não antropocêntrica. Nesse sentido, um determinado ecossistema tem valor por si só. A espécie humana detém direitos especiais a ponto de valorar a natureza em uma unidade de medida proposta por ela (dinheiro) para, então, usá-la a seu bel prazer? Como atribuir valor monetário a um bem que, em última instância, permite a perpetuação da humanidade e das demais espécies do planeta? Argumenta-se que estas perguntas, tão fundamentais, devem ser respondidas fazendo uso de julgamentos de cunho moral e ético, muito mais amplos que a análise de custo/benefício característica das análises quantitativas foco do presente trabalho. Dessa maneira, para respondê-las, seria necessário aprofundar-se na discussão sobre filosofia moral, sobre o valor que

possivelmente atribuímos à natureza para além da lógica utilitarista¹.

Ocorre que a valoração ambiental, como proposta pela teoria aqui investigada, limita-se a abordar o valor utilitarista dos recursos ambientais, não lançando luzes sobre seu aspecto intrínseco. Valoração ambiental é o processo de avaliação da contribuição dos ecossistemas para atingir determinada meta, sendo esta contribuição percebida pelos indivíduos ou não (LIU *et al.* [50]). Assim, a valoração ambiental se ocupa apenas do valor utilitarista, que é antropocentrista e orientado a uma meta específica. De forma que, valorar serviços dos ecossistemas em termos monetários não é negar os seus valores intrínsecos, mas, sim, focar a análise em seu valor utilitarista. No fim das contas, como explicado em LIU *et al.* [50], a valoração ambiental:

1. provê comparações entre o capital natural e o capital físico e humano no que se refere às suas contribuições ao bem-estar humano;
2. monitora a quantidade e qualidade de capital natural ao longo do tempo no que diz respeito à sua contribuição ao bem-estar humano;
3. provê a avaliação de projetos que terão impactos no estoque de capital natural.

Mesmo considerando o objetivo de avaliar apenas o valor utilitarista, é claro que os métodos para valoração ambiental possuem limitações evidentes. Por exemplo, os ecossistemas correspondem a um conjunto de muitas partes e variáveis interdependentes e há muita incerteza na estimação das ações que permitam suas resiliências ou que os fragilizem². Assim, o próprio conhecimento da ecologia é um limitante para a aplicação dos métodos de valoração ambiental. Outro desafio é a estimativa da taxa de desconto no tempo que embute um julgamento ético de valor entre o consumo presente e futuro e, portanto, o legado que deixamos para as gerações futuras.

Apesar das objeções à valoração econômica de serviços ambientais e das limitações dos métodos propostos, argumenta-se que a valoração pode vir a possuir papel importante na tentativa de internalização dos custos ambientais, pode vir a se tornar mais um componente de decisão econômica para gestão de recursos naturais. A seguir, iremos investigar alguns dos métodos propostos para valoração ambiental.

¹O utilitarismo é uma doutrina filosófica, iniciada no século XVIII por Jeremy Bentham, formulada a partir da ideia de que o principal objetivo moral é maximizar a felicidade ou prazer e minimizar o sofrimento ou a dor, isto é, maximizar a utilidade (RACHELS e RACHELS [48]). O arcabouço teórico proposto pelo utilitarismo, o qual influencia até hoje o pensamento de economistas, legisladores, executivos e cidadãos comuns (SANDEL [49]), conduz a análises de custo e benefício em que seria possível quantificar, agregar e computar a utilidade geral. A utilidade forneceria, portanto, uma moeda comum que torna possível comparar valores de natureza distinta, deixando aberta a possibilidade da aplicação das análises de custo e benefício no processo decisório. Uma das principais objeções ao utilitarismo diz respeito à suposta impossibilidade de medir valores de natureza distinta sob a mesma unidade de medida, a utilidade. Nesse sentido, a valoração ambiental enfrenta objeção similar ao procurar medir o valor dos serviços prestados pelos ecossistemas em termos monetários.

²Para uma exposição mais detalhada acerca das características dos ecossistemas, ver capítulo 3.

6.3 Categorias de Valor de Bens e Serviços Ambientais

O capítulo 5 apresentou a distinção entre os capitais natural, físico, humano e intelectual. O capital natural é qualquer estoque provido naturalmente tais como aquíferos, terra, petróleo, gás, florestas, peixes, estoques de biomassa, material genético, a atmosfera do planeta, entre outros. Os serviços dos ecossistemas podem ser entendidos como dividendos decorrentes do capital natural (TEEB [4]). O capital natural deve ser mantido a fim de que os serviços continuem a ser prestados.

A seção 3.2 do presente trabalho apresentou a tipologia clássica das categorias dos diversos serviços prestados pelos ecossistemas, como descrito em MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT [24], qual seja: serviços de provisão, de regulação, culturais e de suporte. O objetivo desta seção é descrever as categorias de valor de bens e serviços ambientais que são agrupadas para realizar a valoração dos ecossistemas.

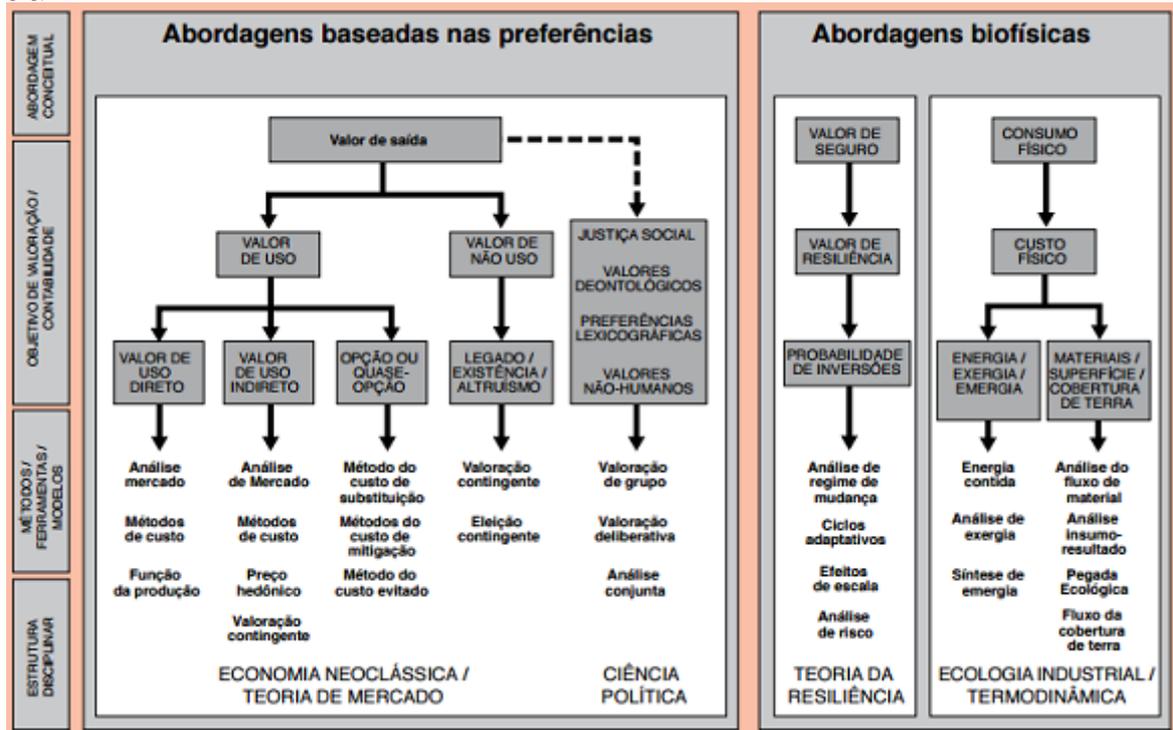
Destaca-se que no rol de serviços prestados pelos ecossistemas há aqueles que são tangíveis, tais como serviços de provisão como o fornecimento de alimentos, mas há também intangíveis tais como os serviços culturais, que agrupam os valores estéticos e recreacionais, por exemplo. Esta distinção entre tangíveis e intangíveis se revela um desafio para a valoração ambiental. O valor de alguns serviços intangíveis, por exemplo, depende do contexto social e cultural. Já outros serviços dependem da quantidade e da qualidade do recurso natural. Outro desafio para a valoração ambiental decorre do fato de que, para grande parte dos serviços prestados pelos ecossistemas, não há um mercado em que estes serviços são transacionados. Dessa forma, como valorar tais bens e serviços ambientais?

No âmbito do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) foi realizado um estudo a partir do ano de 2007 com o objetivo de promover a discussão a respeito dos benefícios econômicos advindos dos serviços prestados pelos ecossistemas e pela biodiversidade, o TEEB - *The Economics of Ecosystems and Biodiversity*. O TEEB contou com a participação de dezenas de colaboradores no mundo todo e também procurou sistematizar o conhecimento produzido a respeito dos métodos para atribuir valor econômico aos ecossistemas e à biodiversidade e fomentar a utilização de tais ferramentas no processo de decisão econômica. Com isso, foram publicados uma série de relatórios direcionados a formuladores de políticas públicas nacionais, locais e para negócios, bem como um relatório sob mudança climática e outro sobre os fundamentos ecológicos e econômicos da valoração de bens e serviços ambientais (TEEB [46]). Este último servirá de referência principal para a redação deste capítulo.

A figura 6.1, cuja fonte é TEEB [4], relaciona diversas abordagens para a esti-

mativa de valoração dos serviços dos ecossistemas. Como era de se esperar, devido à transdisciplinaridade e complexidade do tema, o esforço de investigação a respeito do valor dos serviços ambientais é realizado sob diferentes abordagens, com a utilização de métodos bastante variados, como a figura 6.1 procura sumarizar. A presente dissertação focará esforços na apresentação dos métodos de valoração associados à estrutura disciplinar economia neoclássica/teoria de mercado.

Figura 6.1: Abordagens para a estimativa dos valores da natureza. (fonte: TEEB [4]).



Destaca-se que o consumo de um recurso ambiental se realiza via uso e não uso, de forma que o valor econômico do bem ou serviço ambiental pode ser inicialmente dividido em valor de uso e de não uso. O valor de uso decorre da utilização direta e indireta de bens e serviços ambientais, a serem consumidos hoje ou no futuro. Já o valor de não uso reflete questões morais, éticas, culturais e altruísticas (MOTTA [39]), não se vinculando ao consumo efetivo do bem ou serviço ambiental.

Assim, o valor de não uso corresponde ao valor de existência, de legado e de altruísmo. Por exemplo o valor que as pessoas atribuem ao salvamento das baleias ou preservação de regiões remotas do planeta sem que haja expectativa de consumo (valor de existência) ou considerando o legado que ficará para as próximas gerações (valor de legado) ou ainda, o bem-estar que resulta da garantia de que tal bem será usufruído por terceiros na geração atual (valor de altruísmo).

O valor de uso, por sua vez, pode ser dividido em valor de uso direto, valor de uso indireto e valor de opção. O valor de uso direto corresponde ao valor associado

Tabela 6.1: Componentes do Valor Econômico Total (TEV)

Valor Econômico Total (TEV)					
Valor de Uso			Valor de Não Uso		
Direto	Indireto	Opção	Existência	Legado	Altruísmo

aos bens e serviços ambientais apropriados diretamente da exploração do recurso consumidos hoje. Exemplos de valor de uso direto são bens e serviços de provisão como alimentos, madeira e minérios. Os serviços de provisão tem valor econômico pois geram bem-estar na medida em que os indivíduos utilizam diretamente o recurso. Os bens e serviços ambientais que possuem valor direto podem ou não ser negociados em um mercado formal.

Já o valor de uso indireto corresponde aos bens e serviços que são gerados por ecossistemas, apropriados e consumidos indiretamente hoje. São serviços que, em muitos casos, não são percebidos pelos agentes econômicos até serem extintos ou até que sua qualidade deteriore significativamente. Exemplos de bens e serviços de valor indireto incluem os serviços de regulação como: serviço de controle de erosão e regulação climática decorrente da preservação de florestas, serviço de regularização de água, controle natural de pestes, dispersão e transformação de rejeitos. Estes serviços são parte essencial para o suporte à vida, assim possuem valor econômico na medida em que geram bem-estar embora sejam consumidos indiretamente.

O último valor de uso é o valor de opção. O valor de opção corresponde aos bens e serviços ambientais de usos diretos ou indiretos a serem consumidos e apropriados no futuro. O valor de opção ocorre quando um indivíduo atribui valor em usos diretos e indiretos a fim de manter a opção do consumo no futuro, funcionando como um seguro. O valor atribuído à possibilidade de se esperar até a resolução de uma incerteza é geralmente chamado de quase-opção. Um exemplo de valor de opção é o benefício advindo de fármacos desenvolvidos com base em propriedades medicinais ainda não descobertas de plantas em florestas tropicais. Outra definição do valor de opção é a disposição que um indivíduo tem de pagar para garantir a possibilidade de consumo no futuro, que pode ocorrer ou não.

A tabela 6.1 apresenta os componentes do valor econômico total (TEV).

6.4 Métodos de Valoração

A adoção de um método para valoração de determinado serviço ambiental depende de diversos fatores tais como: objetivo da valoração, disponibilidade de informações - inclusive de parâmetros ecológicos - disponibilidade de recursos, hipóteses assumidas e limitações do método escolhido.

Há diferentes maneiras de agrupar métodos de valoração ambiental. Alguns autores, como MOTTA [39], os dividem em:

1. métodos da função de produção;
2. métodos da função de demanda.

Métodos da Função de Produção

Se o recurso ambiental é um insumo ou um substituto de um bem ou serviço privado, os métodos de função de produção utilizam-se de preços de mercado deste bem ou serviço privado para estimar o valor econômico do recurso ambiental (MOTTA [39]). Os métodos de função de produção são muito utilizados quando a quantidade ou qualidade do bem ou serviço ambiental que se queira valorar possui influência na produção de um bem privado, que é transacionado no mercado. Assim, a estimativa do bem ou serviço ambiental corresponderá ao seu impacto na produção do bem privado. Exemplos bastante evidentes de serviços ambientais que poderiam ser avaliados com a utilização de métodos da função de produção são: a fertilidade do solo que impacta a produção agrícola e a qualidade da água que impacta a produção pesqueira ou atividade de recreação de um rio, por exemplo, como citados em MOTTA [39].

Os métodos de função de produção, por sua vez, podem ser agrupados em:

1. métodos de produtividade marginal;
2. métodos de mercados de bens substitutos (custos de reposição, gastos defensivos ou custos evitados e custos de controle).

Métodos da Função de Demanda

Os métodos da função de demanda admitem que a variação da disponibilidade do recurso ambiental altera o nível de bem estar das pessoas e, portanto, é possível identificar as medidas de disposição a pagar (ou aceitar) das pessoas em relação a estas variações (MOTTA [39]). Dessa maneira, os métodos da função da demanda procuram estimar: a disposição a pagar do agente econômico para obter um benefício, a disposição a pagar para evitar um custo, a disposição a aceitar abrir mão de um benefício e a disposição a aceitar um custo. Estas estimativas correspondem, então, ao valor do recurso ambiental.

Os métodos de função da demanda podem ser agrupados em:

1. mercado de bens complementares (custo de viagem e preços hedônicos);
2. mercado hipotéticos (valoração contingente).

6.4.1 Agrupamento de Métodos segundo o TEEB

O agrupamento de métodos de valoração de serviços ambientais proposto em TEEB [46] baseia-se na disponibilidade de informações a respeito do comportamento dos agentes econômicos. Para os casos em que há transações de mercado para determinado bem ou serviço ambiental, são agrupadas as abordagens de valoração direta do mercado. Para os casos de bens e serviços ambientais para os quais não há mercado organizado, são agrupadas abordagens de valoração derivadas de mercados paralelos ou hipotéticos, então subdivididas em preferências reveladas e declaradas. Assim, segundo LIU *et al.* [50], a principal distinção entre as abordagens para valoração ambiental baseadas em preferências está na fonte de dados que podem ser coletados em mercado reais (preferência revelada) ou hipotéticos (preferência revelada). Assim, o agrupamento de abordagens proposto em TEEB [46] é:

1. Valoração direta do mercado;
2. Preferência revelada;
3. Preferência declarada.

Estes agrupamentos serão detalhados a seguir.

Valoração Direta do Mercado

Em grande medida, um mercado organizado de bens e serviços embute as preferências e custos de seus participantes, assim como descrito na seção 5.1.2 desta dissertação. Ademais, informações como preço, quantidade e custos são de mais fácil obtenção do que quando não há mercado organizado. Estas são as vantagens da abordagem de valoração direta do mercado. Este agrupamento é dividido em:

- Abordagens baseadas em preços de mercado: são muito aplicadas para valoração de bens e serviços de provisão tais como alimentos e demais *commodities* agrícolas. Assumindo que o mercado é bem organizado e funcional, então o preço de mercado reflete as preferências e custos marginais de produção. Na verdade, um produtor privado maximiza seu lucro quando sua receita marginal é igual ao seu custo marginal e, no caso de um mercado em concorrência perfeita em que o produtor é tomador de preços, a receita marginal é exatamente o preço de mercado. Assim, o preço de mercado e quantidade ofertada refletem o benefício para o produtor. Do lado do consumidor, o preço de mercado e a quantidade demandada refletem o benefício para o consumidor sob a égide da lei da oferta e da demanda. Dessa maneira, o preço de mercado é considerado um bom indicador do valor deste bem ou serviço do ecossistema. Assim, o

valor econômico do bem ou serviço ambiental é, então, estimado como o preço vezes a quantidade comercializada.

- Abordagens baseadas em custo: agrupam os métodos nos quais o valor é estimado com base em estimativas de custos para a produção, mitigação ou restauração do bem ou serviço ambiental por meio de capital reproduzível, sem a utilização do capital natural. Muitos economistas acreditam, no entanto, que os métodos baseados em custo não são adequados para medir o valor econômico porque não são baseados em preferências como os métodos de preferência revelada ou declarada (LIU *et al.* [50]). De fato, os métodos baseados em custos não se propõem a estimar as disposições a pagar dos agentes econômicos pelos bens e serviços ambientais. No entanto, argumenta-se que a avaliação dos custos evitados, de reposição e de restauração dos ecossistemas podem fornecer uma estimativa subestimada da disposição a pagar, ainda que não seja possível avaliar a disposição máxima a pagar dos agentes econômicos. Isso acontece porque, se for possível avaliar se os agentes estão dispostos a pagar pelo menos os custos avaliados na valoração, então sua disposição a pagar máxima é igual ou maior do que os custos estimados. Por outro lado, caso os agentes econômicos não estejam dispostos a pagar o custo estimado na valoração, isso deve indicar que o custo é maior do que o valor atribuído pelos agentes ao serviço do ecossistema. As abordagens baseadas em custo podem ser agrupadas em:

- Método dos custos evitados: estima o valor do bem ou serviço ambiental E com base no custo que seria incorrido quando da ausência de tal bem ou serviço. Um exemplo de aplicação deste método é a valoração ambiental da água limpa com base no custo evitado em saúde pública para o tratamento de diarreias na população (exemplo citado em LIU *et al.* [50]). O método de custos evitados também foi utilizado por um estudo que procurou determinar os custos evitados na produção de algodão na região do Texas, EUA, a partir da presença de morcegos que comem mariposas. Ao comer mariposas fêmeas, os morcegos evitam que a plantação de algodão seja utilizada como berçário, evitando que as larvas da mariposa causem danos à lavoura. Assim, foi possível estimar o valor do serviço ambiental prestado pelos morcegos a partir dos custos evitados em danos na produção de algodão. A conclusão do estudo foi que os morcegos são capazes de evitar danos equivalentes entre 2% e 29% do valor da produção dependendo de fatores como a magnitude da infestação de larvas e a utilização de pesticidas;
- Método do custo de reposição: estima o valor do bem ou serviço am-

biental E com base no custo que seria incorrido para substituí-lo com utilização de capital reproduzível. Assim, a valoração de E toma como base os custos incorridos em substitutos para repor alterações nos recursos ambientais, mantendo o nível desejado de E . Um exemplo de aplicação do método de custo de reposição é valoração do serviço ambiental fertilidade do solo que pode ser estimada com base nos custos de fertilização e reparação do solo com vistas a manter a produtividade agrícola. Outro exemplo, é a valoração do serviço de remoção de fósforo de efluentes urbanos prestado por um pântano com base no custo de um substituto funcional ao ecossistema: a construção e operação de estações de tratamento de esgoto. Na utilização do método do custo de reposição é necessário quantificar o serviço ambiental prestado pelo ecossistema e encontrar algo produzido pelo ser humano que ofereça um serviço de mesma qualidade e magnitude a fim de que sejam comparados custos similares. Ademais, há que se selecionar a alternativa feita com capital reproduzível mais barata possível, que seria provavelmente a forma pela qual o ecossistema seria repostos;

- Método do custo de restauração ou mitigação: estima o valor do bem ou serviço ambiental com base no custo que seria incorrido para restaurar o capital natural que produz o serviço ambiental ou o custo incorrido para mitigar os efeitos da perda do bem ou serviço ambiental. Um exemplo da utilização do método do custo de mitigação é a determinação do serviço de proteção de enchentes prestado por um manguezal. Este serviço poderia ser valorado por meio da apuração dos custos de mitigação de enchentes como, por exemplo, os custos de realocação da população que vive em torno do mangue. TEEB [46] cita um exemplo de utilização do método dos custos de restauração para capturar o valor estético de um parque natural. Nesse caso, o valor estético do parque foi estimado como os custos para sua restauração. Em tempo, dificuldades em restaurar os ecossistemas às condições prévias de sua degradação tornam questionável a utilização deste método (TEEB [46]).
- Abordagens baseadas em função de produção: estimam o valor tendo em vista o quanto este bem ou serviço ambiental contribui para a produção de outro bem ou serviço que possui mercado organizado. Nos métodos de função de produção, observa-se o valor do recurso ambiental E pela sua contribuição como insumo ou fator de produção de um outro produto Z , que é negociado em mercado (MOTTA [39]). A ideia central é que melhorias na qualidade e quantidade do recurso ambiental E podem diminuir custos e preços e aumen-

tar a quantidade do bem negociado em mercado Z , conduzindo portanto a aumento do excedente do consumidor e do produtor. Assim, estes métodos requerem inicialmente que sejam estimados os efeitos físicos da mudança na quantidade ou qualidade do bem ou serviço ambiental E na produção de Z , no que se valem de conhecimento científico para considerar esta relação de causa-efeito. As dificuldades na obtenção das relações de causa e efeito residem na complexidade dos ecossistemas e limitação do conhecimento ecológico.

Preferências Reveladas

Os métodos de preferências reveladas são baseados na observação do comportamento de agentes econômicos em mercados existentes relacionados ao bem ou serviço ambiental sob valoração. Há dois principais métodos neste agrupamento que são: a) preços hedônicos e b) custo de viagem.

O método de valoração ambiental de preços hedônicos busca mensurar o preço implícito de atributos ambientais no preço de mercado de um bem ou serviço privado complementar. Assim, o valor do bem ou serviço ambiental está implícito no quanto os consumidores estão dispostos a pagar a mais pelos bens privados que possuem determinados atributos ambientais. O exemplo clássico deste método é a valoração de atributos ambientais em preços de imóveis. Por exemplo, considere os imóveis que possuem proximidade de uma reserva natural. Embora a reserva natural não seja comercializável, geralmente os imóveis próximos a ela possuem preços mais elevados quando comparados com imóveis distantes, tudo o mais permanecendo igual. Esta elevação de preço pode ser atribuída à proximidade da reserva, sendo um indicativo do valor atribuído à reserva natural. Esta mesma análise pode ser aplicada a outros atributos ambientais que também impactam o preço dos imóveis tais como: qualidade do ar, poluição sonora, vista para parques ou praias.

O método de preços hedônicos é uma abordagem estatística que procura estimar uma função hedônica de preço como uma regressão múltipla onde o preço do imóvel é explicado por variáveis de controle refletindo características do imóvel e de sua vizinhança e mais o nível do bem ou serviço ambiental. Uma amostra de imóveis é coletada e são observados atributos que possuam influência nos preços, tais como tamanho, serviços de transporte público disponíveis e a proximidade de mercado de trabalho. A amostra deve ser ter representantes de diferentes localidades e com variados níveis do serviço ambiental que se queira valorar. A partir da composição da amostra, a análise de regressão múltipla procura determinar a relação entre os atributos e os preços dos imóveis. Mantendo os demais atributos constantes, obtém-se a função hedônica que explica a variação de preço do imóvel a partir do nível do bem ou serviço ambiental prestado.

Assim, o preço do imóvel é representado pela função hedônica:

$$P_i = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, \dots, x_{in}, E_i) + u_i \quad (6.1)$$

onde P_i é o preço do imóvel i ; x_{ij} é o atributo j do imóvel i que possui influência no preço final; E_i é o nível do atributo ambiental do imóvel i e u_i é um erro estocástico.

Finalmente, o preço implícito do atributo ambiental E presente no imóvel i (chamemos, P_E) representa a disposição a pagar por uma variação em E e é dado por:

$$P_E = \frac{\partial f}{\partial E} \quad (6.2)$$

A estimativa de valor da reserva natural seria, portanto, o valor de P_E .

O método de preços hedônicos captura os valores de uso direto, indireto e de opção, embora não capte os valores de não uso. Este método assume um conjunto de hipóteses tais como: grande variabilidade de tipos e tamanhos de imóveis, com diferentes localidades e níveis do atributo ambiental avaliado; a racionalidade dos agentes do mercado, que possuem informações a respeito de todas as alternativas e liberdade de escolha; os agentes econômicos podem, ao escolher outro imóvel, aumentar a quantidade de qualquer atributo, mantendo os demais constantes; a variação de E é refletida somente nos preços dos imóveis e a relação do preço dos imóveis com nível do serviço ambiental é linear.

Pela metodologia estatística empregada, há grande necessidade de dados para que seja possível isolar o atributo ambiental por meio de uma regressão múltipla. Outra limitação é que não é possível transferir os resultados de uma localidade para outra e o método assume um conjunto de hipóteses idealizadas acerca do mercado imobiliário como descrito acima. No entanto, o método de preços hedônicos, proposto inicialmente na década de 1970, é bastante usado para valorar bens e serviços ambientais, o que se confirma pelo grande número de trabalhos desenvolvidos com sua utilização.

Já o método de custo de viagem é comumente utilizado para avaliar valores recreacionais relacionados à biodiversidade e aos serviços dos ecossistemas (TEEB [46]). Isto é, fundamenta-se na hipótese de que é possível medir o valor recreacional de um parque natural atribuído por seus visitantes, por exemplo, com base nos custos que eles precisam incorrer para usufruir tais serviços ambientais.

A primeira hipótese assumida pela método do custo de viagem é que o número de visitas ao parque natural é função do custo de viagem, isto é, a demanda pelo serviço ambiental E para os moradores da zona residencial i é função do custo da viagem desta zona i até o parque natural. É importante ressaltar que o custo de viagem deve considerar o custo de oportunidade dos visitantes, além dos custos de deslocamento e ingresso no parque (se houver cobrança), entre outros. Assim:

$$V_i = f(C_i, X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{Ni}) \quad (6.3)$$

onde V_i é o número de visitas ao parque natural feitas por moradores da zona residencial i ; C_i é o custo de viagem da zona residencial i até o parque natural; X s equivalem a outras variáveis relevantes que influenciam o número de visitas, por exemplo, características socioeconômicas e demográficas como renda, idade, sexo, características específicas do parque natural avaliado e a existência ou não de outros parques na região. Adicionalmente, supõe-se que a demanda pela visita é inversamente proporcional ao custo de viagem ($\frac{\partial V_i}{\partial C_i} < 0$).

Evidentemente, as informações a respeito do custo de viagem, características socioeconômicas e demográficas para cada uma das zonas residenciais precisam ser coletadas, o que pode ser feito com base em pesquisas realizadas diretamente com os visitantes do parque natural ou com uma amostra da população que seja considerada como potenciais visitantes. Estima-se, então, o número de visitas de cada zona residencial i como função das variáveis coletadas em uma regressão estatística.

Avaliando o número de visitas para diferentes custos de viagem, obtém-se a curva de demanda de visita do parque natural. Esta curva de demanda revela, portanto, a disposição a pagar pelas visitas e o excedente do consumidor por zona residencial. Assim, o valor atribuído ao parque natural é igual a soma total para todas as zonas residenciais do excedente do consumidor.

O método do custo de viagem captura o valor de uso direto do parque natural estudado, não contemplando os valores de opção e de não uso. Outra limitação é que não é possível transferir os resultados de uma localidade para outra. O método assume que as preferências são idênticas para cada zona residencial. Ademais, a determinação do valor do serviço ambiental E é bastante dependente da maneira pela qual foram estimados os custos de viagem. Finalmente, muitas viagens realizadas pelos agentes econômicos possuem mais de um propósito, isto é, a visita ao parque natural pode ter sido oportuna para os indivíduos que tinham outros propósitos ao viajar para a região, como compras ou negócios. Isto quer dizer que os custos de viagem que os agentes estão dispendendo podem estar associados a mais atividades do que a recreação no parque natural, o que poderia sobrestimar o custo da viagem recreacional.

Preferências Declaradas

Os métodos de valoração de bens ou serviços ambientais sob preferências declaradas procuram simular mercados de serviços de ecossistemas por meio de pesquisas diretas com os indivíduos, a partir das quais são estimadas as disposições a pagar ou a aceitar compensação dos agentes econômicos. Em sua abordagem direta, com aplicação de

questionários, é possível indagar aos indivíduos a respeito de suas disposição a pagar ou a aceitar compensação para que ocorra mudanças no nível do serviço ambiental estudado. As principais técnicas de valoração ambiental com preferências declaradas são: a) método da valoração contingente; b) modelagem da escolha (*choice modeling*) e c) valoração de grupo.

O método de valoração contingente recebe este nome porque esta técnica é baseada na construção de um mercado ou cenário hipotético que pode ou não ocorrer, em uma abordagem direta ao agente econômico. De forma que algumas das principais críticas à valoração contingente é o fato de que este é baseado em informações hipotéticas, enquanto que outros métodos fundamentam-se em comportamentos do indivíduos que de fato ocorrem, ainda que indiretamente para alguns métodos (PERMAN *et al.* [3]). Outra crítica é a inadequação da valoração contingente para estimar valores ambientais que são desconhecidos ou não entendidos pelos indivíduos (MOTTA [39]).

Contudo, a valoração contingente possui a vantagem de capturar os valores de uso e não uso dos bens e serviços ambientais, à diferença dos demais métodos de valoração ambiental. É claro que a aplicação de um questionário para obtenção de estimativas da disposição a pagar ou a aceitar compensação dos indivíduos confere grande importância à composição do questionário e à sua forma de aplicação. De fato, por conta desta condição, a valoração contingente pode levar a uma série de vieses de pesquisa tais como:

- estratégico: subestimação da disposição a pagar se o entrevistado acreditar que realmente terá que pagar o montante respondido na pesquisa. Ou, sobreestimação na disposição a pagar, caso o entrevistado acreditar que não pagará o montante citado;
- hipotético: variabilidade nos valores estimados na disposição a pagar ou a aceitar compensação porque o indivíduo entende que é um mercado hipotético e que, por isso, não terá que arcar com custos de más decisões econômicas como acontece em um mercado real;
- informação: a quantidade, qualidade e maneira que o entrevistado é informado a respeito do bem ou serviço ambiental simulado afeta a resposta recebida;
- entrevistador: o comportamento do entrevistador pode influenciar a resposta recebida.
- ponto inicial: nos questionários em que há sugestões de valores para avaliar a disposição a pagar, o patamar sugerido inicialmente pode influenciar a resposta recebida.

Não obstante, a valoração contingente têm sido muito usada para estimar principalmente os valores de não uso dos bens e serviços ambientais (PERMAN *et al.* [3]), podendo ser empregada para serviços que não possuem mercado organizado (TEEB [46]).

Já a valoração por modelagem da escolha procura modelar o processo de escolha de um agente econômico em determinado contexto (TEEB [46]), baseando-se no fato de que um bem ou serviço é geralmente tratado como a incorporação de um conjunto de atributos (PERMAN *et al.* [3]). Estes atributos são o que realmente interessa aos agentes econômicos em seu processo de escolha. Sob este método, são apresentadas aos indivíduos duas ou mais alternativas com níveis diferenciados de atributos e um dos atributos corresponde ao valor que as pessoas teriam que pagar pelo serviço prestado. Assim, o entrevistado deve escolher uma das alternativas dentre aquelas ofertadas.

Os entrevistados escolhem a alternativa que provê a maior utilidade e, em muitos casos, as escolhas dos indivíduos são analisadas estatisticamente por meio de um modelo multinomial logit. Esta análise é capaz de determinar os *trade-offs* entre os atributos, isto é, quanto os entrevistados abdicam de um atributo em favor de outro. Como um dos atributos é explicitado em moeda, é possível calcular a disposição a pagar dos entrevistados decorrente da mudança da situação atual para uma alternativa que possui nível diferente do serviço ambiental.

Assim, enquanto a valoração contingente avalia um única alternativa, a valoração por modelagem de escolha avalia um conjunto de alternativas de uma só vez. No entanto, este método de valoração coloca muita ênfase na capacidade cognitiva dos entrevistados e na consistência de seus respectivos processos de decisão. Ademais, a valoração por modelagem de escolha está sujeita a vieses similares ao da valoração contingente.

Finalmente, a valoração de grupo combina as técnicas de preferências declaradas com elementos de processo deliberativo provenientes da ciência política (TEEB [46]), sendo gradualmente mais usada para capturar valores negligenciados por uma pesquisa individual, tais como valor do pluralismo e justiça social. A natureza pública dos bens e serviços ambientais, que afetam muitas pessoas e levanta questões associadas à equidade social, coloca em dúvida a adequação de métodos de valoração ambiental baseados em pesquisas com indivíduos (WILSON e HOWARTH [51]). Assim, a valoração de grupo, que deriva de uma convergência de argumentos da economia, psicologia, ciência da decisão e ciência política, propõe um processo de valoração decorrente do debate aberto.

A ideia é reunir um grupo de interessados no bem ou serviço ambiental para deliberarem a respeito do seu valor econômico. Espera-se que, organizados em grupos de debate, os indivíduos possam escolher alternativas levando em conta não

somente seus respectivos interesses privados, mas também valores sociais. Assim, as alternativas escolhidas aumentariam a equidade social e a legitimação política na sua implementação (WILSON e HOWARTH [51]).

Agora que foram apresentados os principais métodos de valoração de serviços do ecossistema, será abordado um exemplo prático contido em artigo de autoria de pesquisadores da Universidade de Stanford, na Califórnia.

6.5 Um Exemplo Prático de Valoração Ambiental: Artigo sobre Valoração do Serviço de Remoção de Fósforo por um Pantanal

6.5.1 Objetivo

O artigo *Firm-level ecosystem service valuation using mechanistic biogeochemical modeling and functional substitutability* (COMELLO *et al.* [5]), cujos autores são Stephen D. Comello, Gabriel Maltais-Landry, Benedict R. Schwegler e Michael D. Lepech, objetiva valorar o serviço de remoção de fósforo de efluentes urbanos e industriais provido por um ecossistema (pantanal), a partir da utilização de um modelo autobiótico que descreve as características deste ecossistema e da utilização do valor de mercado de um substituto funcional a este ecossistema, qual seja: estações de tratamento de esgoto. Foi apresentado o estudo de caso de um estuário no sul do estado norte americano da Califórnia, em Huntington Beach.

6.5.2 Metodologia

O artigo apresenta uma metodologia para caracterizar e prever o comportamento do serviço de remoção de fósforo de um pântano e atribuir valor monetário especificamente a este serviço. Para determinar o valor econômico de um ativo para o qual não há mercado direto, propõe-se uma combinação entre um modelo descritivo e dados de mercados. Assim, propõe-se o uso de um modelo biogeoquímico combinado com a substitutibilidade funcional do serviço do ecossistema (remoção de fósforo) pela estação de tratamento de esgoto.

O presente artigo propõe, portanto, a utilização de metodologia em que o valor dos serviços ambientais - sob o ponto de vista do potencial de remoção de fósforo - de um pantanal (wetland) é medido tomando como base o custo do seu substituto funcional construído pelo homem, isto é, utilizada o método de custo de reposição para valoração ambiental. Como estudo de caso, o artigo aplica a metodologia a um estuário no sul da Califórnia, em Huntington Beach.

6.5.3 Justificativa

Cada vez mais, há empresas privadas que levam em conta critérios sustentabilidade em seus processos de decisão. No entanto, reconhecidamente ainda há grandes desafios na inserção e operacionalização de critérios relacionados a práticas sustentáveis nas decisões gerenciais. Para firmas proprietárias dos recursos naturais, parte desta dificuldade advém da incapacidade em avaliar o valor da conservação destes recursos naturais em contraposição a adiantar a exploração e obter os lucros de sua atividade no presente.

Assim, como valorar o serviço ambiental deste recurso natural e, conseqüentemente, estimar o valor da conservação de tais recursos? Os autores argumentam que a principal motivação na tomada de decisões em uma firma privada é a questão da geração de lucros. Ocorre que há decisões tomadas pelas firmas que geram impacto ambiental. E, a quantidade, qualidade e acessibilidade dos estoques e fluxos de recursos naturais tem evidentes reflexos econômicos para as empresas, isto é, impactos ambientais podem reduzir o lucro das empresas. Assim, valorar serviços ambientais dos recursos naturais de propriedade das empresas produz uma informação importante para o objetivo final da empresa, geração de lucro, e sua viabilidade no longo prazo.

Ademais esta valoração, como está na mesma unidade de medida dos demais ativos da empresa (moeda), pode ser devidamente reportada nas suas demonstrações contábeis. Principalmente, considerando que a metodologia apresentada, ao considerar os custos de mercado de remoção de fósforo, apresenta o valor do serviço prestado pelo ecossistema em valor de mercado (*fair value*), que é a tendência mundial para registros de ativos contábeis.

No fim das contas, a metodologia empregada permite que as empresas considerem a manutenção destes serviços ambientais em seu processo de decisão e mitiga a exposição ao risco de degradação de tais serviços ambientais. Finalmente, uma vez que estes serviços do ecossistema estão quantificados, outras firmas ou instituições podem pagar à empresa detentora do direito de propriedade a fim de se beneficiar de tais serviços. Por exemplo, uma empresa em cima do rio que despeja efluentes que são assimilados pelo pantanal pode vir a pagar para a empresa proprietária para que o seu pantanal preste o serviço de assimilação de seus efluentes.

6.5.4 Substitutibilidade Funcional

A substitutibilidade funcional afirma que o valor mínimo do serviço de um ecossistema pode ser calculado considerando o custo de um sistema construído pelo homem que faça função idêntica. No exemplo do artigo, o serviço de remoção do fósforo de efluentes pode ser realizado pelo ecossistema do pantanal ou por uma estação de

tratamento de esgoto.

Esta é uma forma reducionista de se valorar os ecossistemas, porém possui a vantagem de, definidos os serviços prestados, fazer uma valoração aditiva, na qual o valor de cada função é calculado com base em seu substituto funcional construído com capital reproduzível e o valor final do ecossistema é a soma do valor de cada um de seus serviços.

6.5.5 Descrição do Modelo Biogeoquímico

Uma das funções do ecossistema do pantanal é a remoção de fósforo. Este ecossistema remove a quantidade total de fósforo por meio de alguns mecanismos, dos quais os mais relevantes são: captação de biomassa, sorção e acréscimo de solo. Como os dois primeiros processos atingem os limites naturais em um tempo relativamente curto, no modelo do artigo foi considerado apenas o acréscimo de solo como processo sustentável de remoção de fósforo.

É claro que há uma série de outros serviços ambientais prestados pelo pantanal - ciclo de nitrogênio, biodiversidade, banco genético, entre outros - mas o estudo foca apenas na função remoção de fósforo.

No estudo de caso, um estuário no sul da Califórnia foi modelado em sua capacidade de remover fósforo por meio de um modelo biogeoquímico chamado autobiótico. Este modelo é capaz de prever a performance do estuário em remover fósforo ao longo do tempo.

O valor do ecossistema no tempo está vinculado ao entendimento dos potenciais geradores de uma mudança permanente no pantanal. Este entendimento é obtido por meio do modelo autobiótico, isto é, o modelo irá gerar previsões da performance do ecossistema que podem indicar para a sua saturação ou degradação, a depender por exemplo da quantidade de efluentes ali depositados. E esta previsão está ligada à manutenção do valor econômico do ecossistema. É bem evidente que há aqui uma fonte de incerteza, dada a complexidade da modelagem ecológica.

Em linhas gerais, o modelo autobiótico, em seu submodelo hidrológico, considera a concentração de fósforo na água como o principal motivo para o crescimento de biomassa - plantas e algas. O modelo assume, por exemplo, que a concentração de fósforo decresce linearmente na direção do fluxo da água. Outra premissa é que a quantidade de fósforo removida é proporcional à concentração de fósforo na água - quanto maior a concentração de fósforo, maior a remoção.

Além do submodelo hidrológico, o modelo autobiótico inclui o modelo biogeoquímico que é, em outras palavras, um balanço de biomassa através do tempo. O modelo biogeoquímico, por sua vez, considera fatores como o regime de chuvas, o acréscimo de solo, o estoque de biomassa, o fósforo depositado pelas aves, entre

outros fatores. O fósforo provém da excreção de pássaros migratórios e de efluentes industriais e urbanos, sendo observados dois parâmetros: concentração de fósforo na entrada e o fluxo de efluente.

O estudo de caso é feito na Outer Bolsa Bay (OBB), na praia de Huntington, no sul da Califórnia. A área da OBB é de cerca de 25 hectares com uma profundidade média de 1 metro. Os efluentes recebidos pela OBB provém de uma região industrial e urbana de uma localidade chamada Condado de Orange. Esses efluentes são despejados através de um canal com um fluxo histórico médio de 6,43 milhões de metros cúbicos por ano. OBB é banhada pelo oceano Pacífico e o efeito da maré é amenizado pela proximidade do porto de Huntington e por um canal presente na região. Alguns outros parâmetros do modelo são: precipitação média na localidade, taxa de evapotranspiração, pH e temperatura históricos.

6.5.6 Resultados do Modelo Autobiótico

A partir do balanço de massa, foi estimado que o estuário captura 293 kg/ano (11,5kg/ha) e sequestra 84 kg/ano (3,3 kg/ha) de fósforo total no estado estacionário - uma das premissas do modelo é de que o ecossistema possui um estado mais ou menos constante de remoção de fósforo.

Foi constatado que a densidade teórica máxima de biomassa no estuário seria atingida para um fluxo de fósforo muito superior ao fluxo atual. O fluxo atual é de 0,25 mg/L, enquanto o fluxo teórico máximo é de 9,25 mg/L. Isto mostra que este ecossistema trabalha em nível muito abaixo de sua capacidade de suporte teórica.

6.5.7 Valorando o Serviço de Remoção de Fósforo

Há uma série de tecnologias a serem implementadas em uma estação de tratamento de esgoto que podem ser aplicadas para remover o fósforo da água - algumas tecnologias incluem tratamentos químicos, biológicos ou híbridos.

O artigo utiliza um estudo da *Environmental Protection Agency* (EPA) de 2008 que estimou o custo médio do fósforo removido por unidade de massa pelas estações de tratamento no EUA. Esta é a base usada para valorar o serviço ambiental do pantanal. Nesse estudo da EPA, foram usados dados de 8 estações de tratamento, considerando os custos de capital (20 anos, 6% de juros), operação e de manutenção. Os equipamentos das plantas foram alocados 50% para a redução de fósforo - isso porque as estações de tratamento podem ser utilizadas para remover outros elementos como nitrogênio e *biochemical oxygen demand* (BOD). Houve também alocação de custos - 12% fósforo, 48% para nitrogênio e 40% para BOD. Os preços foram inflacionados para a data do estudo. Dessa maneira, o custo médio de remoção de fósforo foi estimado em USD 6,14/kg.

Tabela 6.2: VPL (6%, 20 anos) do serviço do ecossistema como função da concentração de fósforo na entrada. Grifo para a concentração atual. Fonte: reprodução de COMELLO *et al.* [5]

concentração de entrada (mg/L)	VPL/hectare
0,065	-\$20,04
0,13	\$160,26
0,26	\$239,13
0,52	\$858,22
1,04	\$1.738,68

Assumindo que a estação de tratamento de esgoto desempenha um serviço de remoção de fósforo idêntico ao ecossistema pantanal e, ainda, assumindo que o ecossistema é propriedade da firma privada e que não há outro serviço prestado pelo ecossistema que possua mercado, tem-se que o valor do serviço do ecossistema é igual ao custo da estação de tratamento construída e operada com capital reproduzível - substitutibilidade funcional.

Assim, o valor atual anual do serviço de remoção de fósforo da OBB é de USD 20,38/ha. Tomando como base uma taxa de desconto de 6%, em um horizonte de tempo de 20 anos, o VPL da remoção atual de fósforo pela OBB é de USD 239,13/ha, como exibido na tabela 6.2.

Adicionalmente, a análise de sensibilidade mostrou que 96% da variabilidade do modelo pode ser explicada por seis parâmetros, entre eles, em ordem de relevância: concentração de fósforo na entrada, custo médio de remoção de fósforo, a vazão de efluente, a quantidade de fósforo proveniente das aves migratórias e a concentração de fósforo na biomassa.

6.5.8 Comentários Gerais sobre o Artigo

O artigo *Firm-level ecosystem service valuation using mechanistic biogeochemical modeling and functional substitutability* (COMELLO *et al.* [5]) fez a valoração ambiental do serviço de remoção de fósforo prestado por um pantanal no sul do estado americano da Califórnia que assimila efluentes urbanos e industriais. Para tanto, utilizou o método do custo de reposição, assumindo a substitutibilidade funcional entre o serviço do ecossistema de remoção de fósforo e o tratamento de esgotos em estações de tratamento construídas e operadas com capital reproduzível.

Inicialmente, destaca-se que, ao utilizar valores atualizados de custos de remoção de fósforo e taxas de desconto de mercado, a metodologia empregada conduz ao valor de mercado do serviço do ecossistema. Sob uma perspectiva empresarial, isto é

desejável na medida em que vai ao encontro da tendência mundial de contabilização de ativos levando-se em conta os preços de mercado e não os custos (*fair value*). Nestas condições, argumenta-se que o valor apurado para o serviço do ecossistema é uma estimativa da disposição a pagar dos agentes econômicos, tendo em vista que este mesmo serviço de tratamento de efluentes é regularmente fornecido e cobrado por estações de tratamento de esgoto. Este é um indicativo de que há mercado para o serviço prestado pelo ecossistema ao preço apurado. Dessa maneira, o método de custo de reposição, neste caso, gerou uma estimativa da disposição a pagar, ainda que possivelmente subestimada, uma vez que o método não se presta a medir a disposição máxima dos agentes econômicos a pagar pelos serviços prestados.

Ademais, o estudo focou sua atenção em apenas um serviço prestado pelo ecossistema pantanal, não lançando luzes sobre os demais serviços porventura prestados. Assim, o estudo apurou o valor de uso de um dos serviços prestados pelo ecossistema - a assimilação de fósforo proveniente de efluentes urbanos e industriais. Não foram incluídos os demais valores do pantanal, como os valores de opção, existência, legado, culturais, estéticos ou mesmo serviços indiretos como a potencial proteção contra enchentes ou o controle de pragas. As categorias de valores dos serviços ambientais prestados pelos ecossistemas foram apresentadas em detalhes na seção 6.3 desta dissertação. Segundo os autores do artigo apresentado, esta mesma metodologia de valoração pode ser aplicada a qualquer serviço do ecossistema para o qual:

1. O direito de propriedade esteja estabelecido;
2. Existe um substituto realizado com capital reproduzível, portanto provendo um um serviço comparável que carrega o valor de mercado;
3. Existe um modelo ecológico que descreve o serviço do ecossistema em questão em um nível de detalhe similar ao detalhe ao sistema "engenheiro" substituto.

De forma que a mesma análise poderia ser realizada para outros serviços prestados pelo ecossistema, sendo então somados ao valor final apurado. Dessa maneira, aumentando o número de serviços valorados do ecossistema detido por uma firma, o valor do ativo desta empresa reportado em suas demonstrações contábeis tende a aumentar. Nesse sentido, a agregação de múltiplos serviços e suas inter-relações resultaria em uma acurácia maior da metodologia proposta.

É bem evidente que o modelo autobiótico proposto é detalhado e congrega elevado número de parâmetros. Se com isso resulta em valores mais confiáveis e adaptados ao ecossistema específico, carrega a clara desvantagem relacionada ao custo de gerar e gerir a informação detalhada necessária para alimentar o modelo. Há aqui que se reconhecer a incerteza ecológica advinda da complexidade do ecossistema

estudado. O entendimento do funcionamento dos ecossistemas é, contudo, fundamental para que se proceda a valoração ambiental do serviço a partir do método do custo de reposição. Isso acontece porque este método pressupõe a substitutibilidade funcional entre um serviço ambiental e um serviço prestado a partir de capital reprodutível. Caso o substituto não fosse compatível com o serviço ambiental, toda a análise ficaria comprometida. A complexidade dos ecossistemas foi vista em detalhes nos capítulos 3 e 4 desta dissertação.

Finalmente, o estudo de caso abordado em COMELLO *et al.* [5] é um exemplo bastante tangível da aplicação de um método de valoração ambiental aplicado ao nível da firma. A inserção da valoração ambiental na apuração das demonstrações contábeis de empresas está em linha com o conceito de desenvolvimento sustentável, ao reforçar o pilar ambiental das informações contidas nas demonstrações financeiras empresariais. Nesse sentido, a utilização da valoração de serviços prestados pelos ecossistemas, em especial daqueles cuja propriedade é de uma empresa, contribui para a percepção do meio ambiente como uma capital natural e, espera-se, o inclui no processo decisório dos gestores das empresas.

A inserção do componente ambiental no processo decisório dos agentes econômicos é, aliás, o objetivo último dos esforços no sentido de incluir o meio ambiente na teoria econômica, o que foi visto em detalhes no capítulo 5, e mais especificamente da valoração ambiental, tema do presente capítulo.

Com a apresentação deste exemplo prático do uso de uma técnica de valoração ambiental, encerramos o capítulo 6. Estamos, portanto, prontos para apresentar as conclusões gerais e contribuições desta dissertação.

Capítulo 7

Conclusão

Em linhas gerais, a presente dissertação objetivou identificar os esforços para a inclusão do meio ambiente no processo decisório dos agentes econômicos. Partiu-se da constatação de que são crescentes os impactos negativos da produção econômica no meio ambiente e, assim, foram investigados os limites biofísicos que restringem o crescimento econômico.

Ademais, a relação de complexidade entre o meio ambiente e a economia foi evidenciada com vistas a fornecer uma visão sistêmica do modelo de produção vigente e demonstrar a sua dependência dos serviços ambientais prestados pelos diversos ecossistemas. Assim, foi necessário apresentar as estruturas e funções gerais dos ecossistemas que, no fim das contas, correspondem ao sistema de suporte à vida no Planeta Terra. Não obstante, foram identificados e descritos alguns dos principais impactos antropogênicos nos ecossistemas mundiais que, em sua maioria, são degradados ou explorados de forma não sustentável. Dado o aspecto dinâmico e complexo deste sistema de suporte à vida, no sentido de que congrega diversas variáveis com a emergência de mecanismos de adaptação, auto-organização e de não-equilíbrio estático, foram apresentadas as características de um sistema complexo conceituando o meio ambiente como tal.

A dissertação prosseguiu com a apresentação do embasamento teórico encontrado na economia do meio ambiente e na economia da poluição. Dessa maneira, foram apresentados os conceitos de falhas de mercado, sustentabilidade forte e fraca, assim como modelos relevantes que investigaram o uso ótimo de recursos naturais renováveis e não renováveis. Já na economia da poluição, foram apresentados: o conjunto de análises marginais que objetivam determinar o nível ótimo de poluição, o teorema de Coase e as características dos principais instrumentos à disposição dos governos para perseguir o nível desejado de poluição econômica.

Finalmente, um programa de pesquisa mais recente foi abordado, a valoração dos serviços ambientais, apresentando os principais métodos desenvolvidos, assim como um exemplo prático de aplicação do método de custos de reposição utilizado

para valoração do serviço de remoção de fósforo prestado por um pantanal.

De forma geral, ao longo da dissertação, a inclusão do meio ambiente no processo decisório dos agentes foi avaliada sob um ponto de vista econômico, norteado pelo paradigma do desenvolvimento sustentável o qual não assume o meio ambiente como um obstáculo intransponível ao desenvolvimento econômico.

O presente trabalho constituiu-se, portanto, por uma pesquisa bibliográfica extensa e diversa, tendo em vista a interdisciplinariedade das questões ambientais. Dessa maneira, ao selecionar os temas e sua ordem de apresentação, esta dissertação indica um caminho esperado para que seja possível amenizar os impactos da produção econômica no meio ambiente, elegendo a correta valoração utilitarista dos serviços ambientais como um programa de pesquisa promissor para a consecução deste objetivo. Aqui, há que se lembrar que a valoração ambiental possui fundamentação na relação de complexidade entre o meio ambiente e a sustentabilidade da produção econômica.

Uma das principais limitações à aplicação da valoração ambiental se refere às incertezas científicas quanto ao funcionamento dos ecossistemas. Este campo de estudo vem sendo aprimorado ao longo das últimas décadas, também com a emergência dos estudos da complexidade. Um prosseguimento da linha de pesquisa proposta nesta dissertação é a proposição de uma modelagem ecológica para um recurso natural ainda não estudado com posterior aplicação de um método de valoração ambiental para um de seus serviços ecossistêmicos.

Referências Bibliográficas

- [1] DALY, H. E. “Economics in a Full World”, *Scientific American*, pp. 100–107, 2005.
- [2] COMMON, M., STAGL, S. *Ecological Economics An Introduction*. 1 ed. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2005.
- [3] PERMAN, R., MA, Y., MCGILVRAY, J., et al. *Natural Resource and Environmental Economics*. 3 ed. , Pearson Education Limited, 2003.
- [4] TEEB. *A Economia dos Ecossistemas e da Biodiversidade: Integrando a Economia da Natureza. Uma síntese da abordagem, conclusões e recomendações do TEEB*. In: Report, TEEB, 2010.
- [5] COMELLO, S. D., MALTAIS-LANDRY, G., SCHWEGLER, D. R., et al. “Firm-level ecosystem service valuation using mechanistic biogeochemical modeling and functional substitutability”, *Ecological Economics*, v. 100, pp. 63–73, fev. 2014.
- [6] BRUNDTLAND, G. H., KHALID, M., AGNELLI, S., et al. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. In: Report, United Nations - UN, Genebra, 1987.
- [7] JACKSON, T. *Prosperidade Sem Crescimento: Vida Boa em um Planeta Finito*. 1 ed. São Paulo, Planeta Sustentável, 2013.
- [8] AYRES, R. U. “On Industrial Ecosystems”. In: Ayres, R. U., Ayres, L. W. (Eds.), *A Handbook of Industrial Ecology*, 1 ed., pp. 44–59, Cheltenham, UK, Edward Elgar, 2002.
- [9] WILSON, E. O. *Diversidade da Vida*. 1 ed. São Paulo, Companhia das Letras, 2012.
- [10] GOLEMAN, D. *Inteligência Ecológica: O Impacto do que Consumimos e as Mudanças que Podem Melhorar o Planeta*. 1 ed. São Paulo, SP, Brasil, Elsevier Editora Ltda, 2009.

- [11] FERNANDEZ, B. P. M. “Ecodesenvolvimento, Desenvolvimento Sustentável e Economia Ecológica: em que sentido representam alternativas ao paradigma de desenvolvimento tradicional?” *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 23, pp. 109–120, jan. 2011.
- [12] KRUGMAN, P., WELLS, R. *Introdução à Economia*. 1 ed. Rio de Janeiro, Elsevier Editora Ltda, 2007.
- [13] UN. *Statistical Yearbook 2016*. Relatório técnico, United Nations Department of Economic and Social Affairs, New York, 2016.
- [14] UN. *Demographic Yearbook 1971*. Relatório técnico, United Nations Department of Economic and Social Affairs, New York, 1972.
- [15] DUPAS, G. *O Mito do Progresso ou Progresso como Ideologia*. 2 ed. São Paulo, SP, Brasil, Editora Unesp, 2012.
- [16] CARSON, R. *Primavera Silenciosa*. 2 ed. São Paulo, Edições Melhoramentos, 1969.
- [17] MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J., et al. *The Limits to Growth*. 1 ed. New York, Universe Books, 1972.
- [18] IEA. *Key World Energy Trends: Excerpt from: World Energy Balances*. Relatório técnico, International Energy Agency, Paris, France, 2016.
- [19] CHANG, H. J. *Economia: Modo de Usar Um Guia Básico dos Principais Conceitos Econômicos*. 1 ed. São Paulo, SP, Brasil, Portfolio-Penguin, 2015.
- [20] FAUCHEUX, S., NOËL, J. F. *Economia dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente*. Lisboa, Instituto Piaget, 1995.
- [21] BOTKIN, D. B., KELLER, E. A. *Environmental Science: Earth as a Living Planet*. 8 ed. USA, John Willey and Sons, Inc., 2011.
- [22] BERG, L. R., HAGER, M. C., HASSENZAHN, D. M. *Visualizing Environmental Science*. 3 ed. USA, John Willey and Sons, Inc., 2011.
- [23] ODUM, E. P. “Ecosystem Theory”. In: Pfafflin, J. R., Ziegler, E. N. (Eds.), *Encyclopedia of Environmental Science and Engineering*, 5 ed., cap. 18, Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 2006.
- [24] MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. 1 ed. Washington, DC, USA, Island Press, 2005.

- [25] DALY, H. E. *Ecological Economics and Sustainable Development, Selected Essays of Herman Daly*. 1 ed. MA, USA, Edward Elgar Publishing, 2007.
- [26] HINRICHS, R. A., KLEINBACH, M. *Energia e Meio Ambiente*. 1 ed. São Paulo, SP, Cengage Learning, 2008.
- [27] POLLACK, H. *Um mundo sem gelo*. 1 ed. São Paulo, SP, Edições Rosari Ltda, 2011.
- [28] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Summary for Policymakers. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [29] LOVELOCK, J. *Gaia: Alerta Final*. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Editora Intrínseca, 2010.
- [30] KOLBERT, E. *A Sexta Extinção: Uma História Não Natural*. 1 ed. Rio de Janeiro, Editora Intrínseca Ltda, 2015.
- [31] RUSSEL, B. *História do Pensamento Ocidental: a Aventura dos Pré-socráticos a Wittgenstein*. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Ediouro, 2001.
- [32] PRADO, E. F. S. “Três Concepções de Complexidade”. In: *Economia, Complexidade e Dialética*, 1 ed., São Paulo, Plêiade, 2009.
- [33] MORIN, E. *Inrodução ao Pensamento Complexo*. 5 ed. Porto Alegre, Editora Sulina, 2015.
- [34] MITCHELL, M. *Complexity: A Guided Tour*. 1 ed. New York, USA, Oxford University Press, 2009.
- [35] SHIRLEY, M. M., WANG, N., MÉNARD, C. “Ronald Coase’s impact on economics”, *Journal of Institutional Economics*, v. 11, n. 2, pp. 227–244, 2015.
- [36] SHILLER, R. “Is economics a science?” The Guardian, Nov. 2013. Disponível em: <https://www.theguardian.com/business/economics-blog/2013/nov/06/is-economics-a-science-robert-shiller>>. Acesso em: 2 dez. 2016.
- [37] BRESSER-PEREIRA, L. C. “Os Dois Métodos e o Núcleo Duro da Teoria Econômica”, *Revista de Economia Política*, v. 29, n. 2, pp. 163–190, abr. 2009.

- [38] NELSON, R. R., WINTER, S. G. *An Evolutionary Theory of Economic Change*. 1 ed. Cambridge, Massachusetts, USA, Harvard University Press, 1982.
- [39] MOTTA, R. S. D. *Manual Para Valoração Econômica de Recursos Ambientais*. In: Manual, IPEA/MMA/PNUD/CNPQ, Rio de Janeiro, 1997.
- [40] FATHEUER, T. *Nova Economia da Natureza Uma Introdução Crítica*. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Fundação Heinrich Böll, 2014.
- [41] HOTELLING, H. “The economics of Exhaustible Resources”, *Journal of Political Economy*, v. 39, n. 2, pp. 137–175, abr. 1931.
- [42] PEARCE, D., TURNER, R. K. *Economics of natural resources and the environment*. London, UK, Harvester Wheatsheaf, 1990.
- [43] GEORGESCU-ROEGEN, N. *The Entropy Law and the Economic Process*. 1 ed. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1971.
- [44] STEWART, I. *17 Equações que Mudaram o Mundo*. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Zahar, 2013.
- [45] CLEVELAND, C. J., RUTH, M. “When, where, and by how much do biophysical limits constrain the economic process? A survey of Nicholas Georgescu-Roegen’s contribution to ecological economics”, *Ecological Economics*, v. 22, n. 3, pp. 203–223, set. 1997.
- [46] TEEB. *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Ecological and Economic Foundations*. In: Report, TEEB, 2010.
- [47] TIETENBERG, T., LEWIS, L. *Environmental and Natural Resource Economics*. 9 ed. USA, Pearson Education, 2012.
- [48] RACHELS, J., RACHELS, S. *Os Elementos da Filosofia Moral*. 7 ed. Porto Alegre, RS, AMGH Editora Ltda, 2013.
- [49] SANDEL, M. J. *Justiça: O Que É Fazer a Coisa Certa*. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Civilização Brasileira, 2013.
- [50] LIU, S., COSTANZA, R., FARBER, S., et al. “Valuing Ecosystem Services: Theory, Practice, and the Need for a Transdisciplinary Synthesis”, *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 1185, pp. 54–78, jan. 2010.
- [51] WILSON, M. A., HOWARTH, R. B. “Discourse-based valuation of ecosystem services: establishing fair outcomes through group deliberation”, *Ecological Economics*, v. 41, pp. 431–443, jun. 2002.