



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP
Faculdade de Engenharia de Alimentos - FEA
Departamento de Engenharia de Alimentos - DEA
Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática Aplicada - LEIA

SÍNTESE DOS MÉTODOS DE PEGADA ECOLÓGICA E ANÁLISE EMERGÉTICA PARA DIAGNÓSTICO DA SUSTENTABILIDADE DE PAÍSES

O BRASIL COMO ESTUDO DE CASO

LUCAS GONÇALVES PEREIRA
Engenheiro de Alimentos – UNICAMP, 2005
Orientador: Prof. Dr. Enrique Ortega Rodriguez

Campinas – São Paulo

2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

P414s Pereira, Lucas Gonçalves
Síntese dos métodos de pegada ecológica e análise emergética
para diagnóstico da sustentabilidade de países – O Brasil como
estudo de caso. -- Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Enrique Ortega Rodriguez
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia de Alimentos

1. Emergia. 2. Pegada ecológica. 3. Sustentabilidade. 4.
Brasil. 5. Transformidade. I. Ortega Rodriguez, Enrique. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de
Alimentos. III. Título.

(ca rs/fea)

Título em inglês: Convergence of emergy analysis and ecological footprint
methods as a sustainability indicator of countries - Brazil
as case study

Palavras-chave em inglês (Keywords): Emergy, Ecological Footprint,
Sustainability, Brazil, Transformity

Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos

Banca examinadora: Enrique Ortega Rodriguez

Marta Camargo de Assis

José Maria Gusman Ferraz

Programa de Pós Graduação: Programa em Engenharia de Alimentos



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS - UNICAMP
Faculdade de Engenharia de Alimentos - FEA
Departamento de Engenharia de Alimentos - DEA
Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática Aplicada - LEIA

SÍNTESE DOS MÉTODOS DE PEGADA ECOLÓGICA E ANÁLISE EMERGÉTICA PARA DIAGNÓSTICO DA SUSTENTABILIDADE DE PAÍSES

O BRASIL COMO ESTUDO DE CASO

Dissertação apresentada à banca
examinadora como parte dos
requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia
de Alimentos.

LUCAS GONÇALVES PEREIRA
Engenheiro de Alimentos – UNICAMP, 2005
Orientador: Prof. Dr. Enrique Ortega Rodriguez

Campinas – São Paulo

2008

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Enrique Ortega Rodriguez
Orientador DEA/FEA/UNICAMP

Dra. Marta Camargo de Assis
Membro – EMBRAPA/CNPMA

Dr. José Maria Gusman Ferraz
Membro – EMBRAPA/CNPMA

*“Aos meus pais
Flavio Soares Pereira e
Eloisa Maria Gonçalves Pereira”*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pela criação, pela educação, pela paciência, pelo apoio nos momentos de angústia e pela confiança em mim depositada.

Aos colegas e amigos de laboratório: Alexandre, Consuelo, Fábio, Feni, John, Juliana, Marcão, Marlei, Otávio, Raul e Teldes pela convivência educativa e prazerosa.

Aos companheiros de República e a todos os amigos conquistados ao longo do período de Pós-Graduação.

Ao professor Ortega, pela orientação acadêmica, por todo o conhecimento transmitido e pelas inquietações compartilhadas.

Ao Dr. José Maria Gusman, por compor a banca examinadora, pelo conhecimento e sugestões transmitidos ao longo da elaboração de minha pesquisa e pela colaboração nos projetos desenvolvidos no LEIA.

À Dra. Marta Camargo de Assis, por compor a banca examinadora e pelas valiosas sugestões para a elaboração final da dissertação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

“A Terra provê o suficiente para a necessidade de todos os homens,
mas não para a voracidade de todos.”

Mahatma Ghandi

SUMÁRIO

RESUMO.....	xxiii
ABSTRACT.....	xxv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVA.....	5
3. HIPÓTESE.....	7
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
4.1. ECONOMIA ECOLÓGICA.....	9
4.2. CAPACIDADE DE SUPORTE.....	13
4.3. SUSTENTABILIDADE.....	20
4.4. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE.....	25
4.5. EMERGIA E ANÁLISE EMERGÉTICA.....	30
4.6. PEGADA ECOLÓGICA.....	36
4.6.1. Pegada Ecológica Convencional.....	37
4.6.1.1. Suposições.....	37
4.6.1.2. Unidade de Medida.....	39
4.6.1.3. Fatores de Equivalência.....	40
4.6.1.4. Fatores de Rendimento.....	42
4.6.1.5. Técnicas de Cálculo da Pegada Ecológica Convencional.....	44
4.6.1.6. Os Componentes da Pegada Ecológica.....	45
4.6.1.6.1. O Consumo (Pegada).....	46
4.6.1.6.2. A Oferta da Natureza (Biocapacidade).....	55
4.6.1.7. Saldo Ecológico.....	59
4.6.1.8. Números da Pegada Ecológica.....	60
4.6.2. Pegada Ecológica baseada na Produtividade Primária Líquida.....	64
4.6.3. Pegada Ecológica baseada na Emergia.....	70
4.6.3.1. Cálculo da Biocapacidade.....	71
4.6.3.2. Cálculo da Pegada.....	74
5. OBJETIVO.....	79
5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	79
6. METODOLOGIA.....	81
6.1. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....	81
6.2. METODOLOGIA PROPOSTA.....	83
6.2.1. Primeira Etapa: Diagrama.....	83
6.2.2. Segunda Etapa: Densidade Emergética.....	85
6.2.3. Terceira Etapa: Biocapacidade.....	88
6.2.4. Quarta Etapa: Pegada.....	94
6.2.5. Quinta Etapa: Análise das Relações Biocapacidade-Pegada.....	99
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	101
7.1. DIAGRAMA.....	101
7.2. BIOCAPACIDADE.....	106
7.2.1. Ecossistemas Naturais Preservados.....	106
7.2.1.1. Floresta Amazônica.....	107

7.2.1.2. <i>Mata Atlântica</i>	109
7.2.1.3. <i>Cerrado</i>	109
7.2.1.4. <i>Pantanal</i>	110
7.2.1.5. <i>Caatinga</i>	111
7.2.1.6. <i>Pampas</i>	112
7.2.1.7. <i>Zonas Costeiras</i>	112
7.2.2. <i>Cultivo, Pastagem e Floresta</i>	113
7.2.3. <i>Área Humana</i>	114
7.2.4. <i>Espaços Não Ocupados pelo Homem</i>	114
7.2.5. <i>Integridade da Cobertura Vegetal Nativa dos Biomas Brasileiros</i>	118
7.2.6. <i>Discussão dos Resultados de Biocapacidade</i>	120
7.3. CÁLCULO DAS TRANSFORMIDADES PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DOS BIOMAS BRASILEIROS.....	122
7.4. PEGADA.....	124
7.4.1. <i>Discussão dos Resultados de Pegada</i>	126
7.5. RELAÇÕES BIOCAPACIDADE-PEGADA.....	131
7.5.1. <i>Saldo Ecológico</i>	131
7.5.2. <i>Fator Capacidade de Suporte</i>	132
7.6. COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS.....	133
7.7. DEFICIÊNCIAS DA PEGADA ECOLÓGICA CONVENCIONAL.....	136
7.7.1. <i>Dados Agregados e Diferenças entre os Tipos de Área</i>	136
7.7.2. <i>Uso Hipotético e Insustentável da terra</i>	138
7.7.3. <i>Uso Sustentável de Energia</i>	139
7.7.4. <i>Áreas Excluídas do Cálculo</i>	139
7.8. DEFICIÊNCIAS DA ANÁLISE EMERGÉTICA.....	140
7.8.1. <i>Sustentável ou Insustentável?</i>	140
7.8.2. <i>Determinação dos Fluxos Renováveis</i>	141
7.8.3. <i>Transformidade</i>	142
8. CONCLUSÕES.....	145
9. REFERÊNCIAS.....	149
ANEXO I.....	159
APÊNDICE I.....	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: População Mundial, 1950 – 2050, de acordo com diferentes projeções.....	2
Figura 2: População versus tempo – Crescimentos Exponencial e Logístico.....	14
Figura 3: Biomassa versus tempo - Desenvolvimento teórico da biomassa total de um ecossistema durante a sucessão ecológica.....	17
Figura 4: Uso Sustentável: Analogia do balde de água.....	21
Figura 5: Sociedade, Natureza e Economia e o desenvolvimento sustentável.....	26
Figura 6: Diagrama simplificado de fluxos de energia para cálculo dos índices energéticos.....	32
Figura 7: Relação Recursos-Economia-Resíduos na Pegada Ecológica.....	36
Figura 8: Esquema do modelo espacial GAEZ 2000.....	42
Figura 9: Áreas Bioprodutivas Globais: Hectares e Hectares Globais por Categoria.....	43
Figura 10: A Pegada Ecológica é uma medida da pressão imposta por uma determinada população sobre a natureza.....	45
Figura 11: Categorias da Pegada.....	46
Figura 12: Pegada Global por Categorias de Consumo: 1960 – 2003.....	49
Figura 13: Estrutura de Cálculo da Pegada. Para simplificar esse esquema, excluem-se produtos secundários e energia nuclear. As estimativas de energia fóssil podem ser utilizadas em alternativa às emissões de CO ₂	54
Figura 14: Categorias da Biocapacidade.....	55
Figura 15: Estrutura de Cálculo da Biocapacidade. As estimativas de energia da biomassa podem ser utilizadas em alternativa às áreas de seqüestro de CO ₂	58
Figura 16: Reserva Ecológica: Biocapacidade > Pegada.....	59
Figura 17: Déficit Ecológico: Pegada > Biocapacidade.....	60
Figura 18: Evolução da Pegada Ecológica da Humanidade (1961-2003).....	61
Figura 19: Pegada Ecológica versus IDH.....	63
Figura 20: Estrutura de Cálculo da Biocapacidade proposta por Zhao et al. (2005).....	73
Figura 21: Estrutura de Cálculo da Pegada proposta por Zhao et al. (2005).....	76

Figura 22: Biomas Brasileiros de acordo com o IBGE (2004).....	82
Figura 23: Diagrama de fluxos de energia de um sistema de produção genérico.....	84
Figura 24: Diagrama de fluxos de energia de um sistema de produção genérico com a divisão de “Área Natural” e “Área Antrópica”.....	85
Figura 25: Recursos Renováveis considerados para o cálculo da Biocapacidade.....	89
Figura 26: Estrutura de Cálculo da Biocapacidade segundo metodologia proposta nesse trabalho.....	92
Figura 27: Estrutura de Cálculo da Pegada segundo metodologia proposta nesse trabalho.....	98
Figura 28a: Diagrama Sistêmico do Brasil.....	105
Figura 28b: Diagrama Sistêmico dos Espaços não ocupados pelo Homem no Planeta..	115
Figura 29: Biocapacidade do Brasil por Categorias.....	121
Figura 30: Pegada do Brasil por Categorias.....	126
Figura 31: Exportações e importações brasileiras em termos de área (hectares).....	129
Figura 32: Diagrama Sistêmico Resumido do Brasil (valores em seJ/ano).....	130
Figura 33: Saldo Ecológico do Brasil.....	132
Figura 34: Pegada para categorias selecionadas segundo as 3 abordagens.....	134
Figura 35: Fator Capacidade de Suporte segundo as 4 abordagens.....	135

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Modelo de Tabela para Cálculo dos Fluxos de Energia.....	33
Tabela 2: Fatores de Equivalência (dados de 2001).....	40
Tabela 3: Fatores de Rendimento (Dados de 2001).....	43
Tabela 4: Exemplos de Produtos Primários e Secundários.....	48
Tabela 5: Pegada Global por Categorias: 2001 e 2003.....	53
Tabela 6: Pegada Ecológica, Biocapacidade e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de Países (Dados de 2003).....	62
Tabela 7: Fatores de Equivalência para Pegada Ecológica baseada na NPP.....	68
Tabela 8: Biocapacidade, Pegada e Balanço Ecológico: EF-NPP e EF-GAEZ.....	69
Tabela 9: Energia Total do planeta.....	71
Tabela 10: Biocapacidade para a província de Gansu (2000).....	72
Tabela 11: Pegada para a província de Gansu (2000).....	75
Tabela 12: Densidade Emergética para diferentes áreas.....	87
Tabela 13: Modelo de tabela para a apresentação dos resultados da Biocapacidade.....	91
Tabela 14: Modelo de tabela para a apresentação dos resultados da Pegada.....	97
Tabela 15: Cobertura Vegetal Nativa Intacta dos Biomas Brasileiros.....	107
Tabela 16: Resultados da Biocapacidade para a Floresta Amazônica.....	108
Tabela 17: Resultados da Biocapacidade para a Mata Atlântica.....	109
Tabela 18: Resultados da Biocapacidade para o Cerrado.....	110
Tabela 19: Resultados da Biocapacidade para o Pantanal.....	111
Tabela 20: Resultados da Biocapacidade para a Caatinga.....	111
Tabela 21: Resultados da Biocapacidade para os Pampas.....	112
Tabela 22: Resultados da Biocapacidade para as Zonas Costeiras.....	113
Tabela 23: Resultados da Biocapacidade para as áreas de Cultivo, Pastagem e Floresta.....	114

Tabela 24: Resultados da Biocapacidade para a Área Urbana.....	114
Tabela 25: Resultados da Biocapacidade para os Espaços Não Ocupados pelo Homem.....	116
Tabela 26: Resumo da Biocapacidade do Brasil por categorias.....	117
Tabela 27: Cobertura Vegetal Nativa Intacta dos Biomas Brasileiros.....	119
Tabela 28: Biocapacidade dos Ecossistemas Preservados.....	120
Tabela 29: Transformidades para Produção de Biomassa dos Biomas Brasileiros.....	123
Tabela 30: Transformidades para Produção de Biomassa de Ecossistemas.....	123
Tabela 31: Resumo da Pegada do Brasil por Categorias (Dados de 2004).....	125
Tabela 32: Produção, Exportação e Importação em hectares.....	128
Tabela 33: Pegada Ecológica do Brasil de acordo com diferentes métodos.....	133
Tabela 34: Cálculos da Biocapacidade do Brasil.....	163
Tabela 35: Cálculos da Pegada do Brasil (Dados de 2004).....	170

RESUMO

O homem está enfrentando um desafio sem precedentes: há um consenso de que os ecossistemas da Terra não podem sustentar os níveis de atividade econômica e de consumo de energia atuais. Para determinar o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente e seus níveis de sustentabilidade são necessários parâmetros ou indicadores obtidos por metodologias que cumpram esses objetivos. A Análise Emergética pode avaliar o capital natural e os serviços ecossistêmicos. O método é capaz de quantificar o trabalho feito pela natureza na produção de bens e recursos. Por outro lado, a Pegada Ecológica vem sendo promovida como uma ferramenta de planejamento da sustentabilidade. Apesar de ser um dos métodos mais populares atualmente, ele tem recebido muitas críticas, especialmente devido à sua visão antropocêntrica. Um cálculo modificado combinando esses dois métodos foi proposto por Zhao et al. (2005), mas não foi suficiente para solucionar todas as deficiências encontradas na metodologia convencional da Pegada Ecológica. O objetivo desse trabalho é sugerir modificações e incluir não só o conceito, mas o método da Análise Emergética nos cálculos. A biocapacidade foi estimada como função dos recursos renováveis disponíveis no sistema. O consumo foi agrupado em categorias: cultivo, produtos florestais, produtos animais e recursos energéticos. Todos os fluxos de energia foram calculados em Joules e depois convertidos para energia solar (seJ/ano) utilizando-se o fator de conversão chamado de “transformidade” (seJ/J). Os fluxos de energia foram, então, divididos pela densidade emergética global (seJ/ha) para se obter uma área equivalente global da pegada. Para demonstrar o mecanismo da metodologia proposta, aplicou-se para o caso do Brasil. Os resultados obtidos foram que o país apresenta uma pegada de 41,88 gha/pessoa e uma biocapacidade de 64,71 gha/pessoa. Comparando-se com o método convencional da Pegada Ecológica, a abordagem emergética demonstrou resultados mais pessimistas para a realidade ecológica brasileira.

Palavras-Chave: Emergia, Pegada Ecológica, Sustentabilidade, Brasil, Transformidade

ABSTRACT

Mankind is facing a challenge without precedents: there is a consensus that Earth's ecosystems can no longer support today's levels of economic activities and energy consumption. In order to determine the impact of human activities on the environment and the levels of sustainability, parameters and indicators are necessary. Emergy accounting can evaluate natural capital and ecosystem services. It is able to quantify the work done by nature to produce resources. On the other hand, the Ecological Footprint method has been promoted as a planning tool for sustainability. Despite being one of the most popular methods nowadays, it has received many critiques, especially because of its anthropocentric point-of-view. A modified calculation combining those two methods was proposed by Zhao et al. (2005), but it is not adequate for solving all the problems found in the Ecological Footprint. The aim of this work is to suggest some modifications and include the full concept of emergy into the calculation. The biocapacity was estimated as function of the renewable resources available. Consumption was grouped in categories: cropland, forestry, animal products, and energy resources. All the energy flows were estimated in Joules and then transformed into solar emergy (seJ/year) using the conversion factor "transformity" (seJ/J). The emergy flows were divided by the "global emergy density" (seJ/gha) to obtain the "equivalent global area". To demonstrate the mechanics of this new method, we applied it to the case of Brazil. The results were that Brazil has an ecological footprint of 41,88 gha/cap and a biocapacity of 64,71 gha/cap. Compared with conventional footprint calculations, the emergy based approach showed more pessimist results for Brazilian ecological reality.

Keywords: Emergy, Ecological Footprint, Sustainability, Brazil, Transformity

1. INTRODUÇÃO

O homem está enfrentando um desafio sem precedentes: há um consenso de que os ecossistemas da Terra não podem sustentar os níveis de atividade econômica e de consumo de energia atuais. De acordo com O'Meara (1999) as áreas urbanas, com um pouco mais da metade da população mundial, são responsáveis por 80% das emissões de carbono, 75% do uso da madeira e 60% do consumo de água. Ocupam apenas 5% da área do mundo inteiro, mas consomem 75% dos seus recursos. As cidades podem ser consideradas como "pontos quentes", pois um hectare de uma área metropolitana consome mais de 1000 vezes a energia que uma área semelhante utiliza em um ambiente natural.

Ao mesmo tempo, a atividade econômica mundial medida pelo Produto Mundial Bruto (GWP) está crescendo 4% ao ano. Um dos fatores que estão levando a essa expansão é o crescimento da população mundial: em 1950, havia 2,5 bilhões de pessoas, enquanto hoje existem mais de seis bilhões. Projeções mais pessimistas feitas pelo relatório de 2006 da Divisão de População do Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas estimam uma população de mais de 11 bilhões de pessoas para o ano de 2050 (ONU, 2007).

Através do último relatório Living Planet Report (Hails et al., 2006), é possível perceber que as atividades humanas têm se apropriado de grandes áreas produtivas do planeta, diminuindo a proporção per capita desses espaços ecológicos. Porém, o desafio para a sustentabilidade é distribuído de forma desigual. A pressão ecológica exercida por um morador dos EUA, por exemplo, é 13 vezes maior que de um residente na Índia e 52 vezes maior que um morador da Somália (Hails et al., 2006).

O crescimento da população é um problema que afeta principalmente os países em desenvolvimento. Nos países desenvolvidos, a taxa percentual de crescimento populacional é muito baixa ou até negativa. Por outro lado, a demanda energética é altíssima. Segundo Daily e Ehrlich (1996), um dos fatores críticos limitantes para se atingir a sustentabilidade é a superpopulação combinada com o estilo de vida humano.

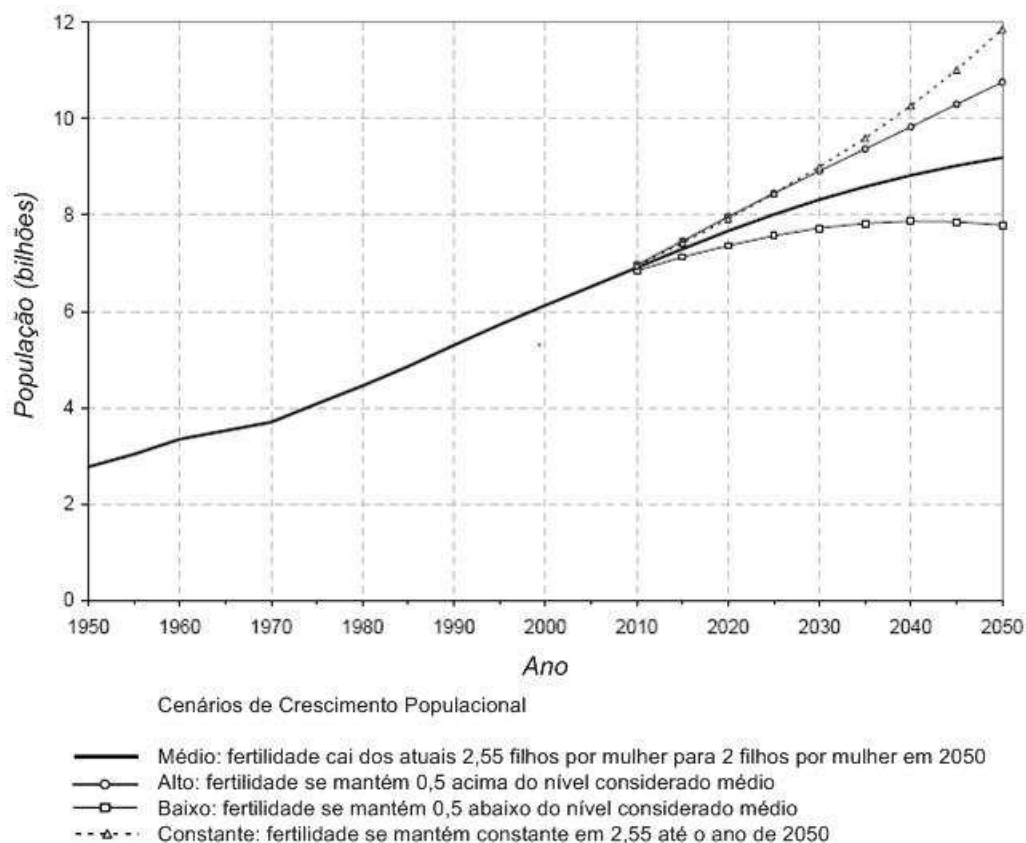


Figura 1: População Mundial, 1950 – 2050, de acordo com diferentes projeções

Fonte: Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. World Population Prospects: The 2006 Revision. United Nations. 2007

Segundo o IBGE (2004), no caso do Brasil, apesar da taxa de crescimento populacional ainda ser maior do que a de países desenvolvidos, a previsão é de que esse crescimento diminua bastante nos próximos anos. A população continuará crescendo, embora a taxa cada vez menores: dos 3% ao ano entre 1950 e 1960, a taxa caiu para 1,44% ao ano em 2004, cairá para 0,24% em 2050 e, finalmente, para zero em 2062, quando a população brasileira começará a se reduzir.

Em 34 anos, a população brasileira praticamente dobrou em relação aos 90 milhões de habitantes da década de 1970 e, entre 2000 e 2004, aumentou em 10 milhões de pessoas. Em 2050, serão 259,8 milhões de brasileiros e a expectativa de vida, ao nascer, será de 81,3 anos. Mas o envelhecimento da população está se acentuando: em 2000, o grupo de 0 a 14 anos representava 30% da população brasileira, enquanto os maiores de 65 anos eram apenas 5%; em 2050, os dois grupos se igualarão em 18% (IBGE, 2004). Pela Projeção de População do IBGE, em 2062, o número de brasileiros vai

parar de aumentar. Apesar do crescimento populacional, aparentemente não ser um problema do Brasil para o futuro, uma das questões mais importantes no que se refere à capacidade de suporte é a demanda de recursos que essa população impõe sobre o meio ambiente.

O crescimento populacional mundial e a dependência cada vez maior de fontes de energia não-renováveis tornam preocupante a manutenção da população no planeta. Os resultados obtidos por Brown (1998) na Análise Emergética da Biosfera geram preocupação: os índices emergéticos mostram que a partir de 1962 a humanidade passou a usar mais recursos não-renováveis do que renováveis na razão próxima à relação 3/1. Estamos distantes de um desenvolvimento baseado principalmente em recursos naturais renováveis. O ajuste necessário deve ser feito por duas ou três gerações humanas, de acordo com Smil (1997).

Apesar de todos os avanços tecnológicos, a humanidade permanece em estado de dependência da produtividade e dos serviços da ecosfera. Do ponto de vista ecológico, terra adequada e capital natural produtivo são fundamentais para a continuação da civilização no planeta (Rees, 1992). Indicadores de impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente são importantes não somente como ferramenta didática, mas também como base para tomada de decisões por parte de instituições públicas e privadas. Os resultados podem funcionar como guia e proporcionar busca por mudanças nos padrões de vida da população.

2. JUSTIFICATIVA

Ainda não existe um consenso na comunidade científica mundial acerca de um método de avaliação da sustentabilidade de países. Em um estudo comparativo de indicadores de sustentabilidade, Siche et al. (2005) concluíram que os melhores indicadores que podem explicar a realidade ecológica de um sistema nacional são a Pegada Ecológica e a Análise Emergética.

A Pegada Ecológica vem sendo promovida por seus autores como uma ferramenta de planejamento da sustentabilidade. Uma das suas vantagens é o apelo intuitivo e didático. Junto com o desenvolvimento contínuo da metodologia, esse apelo tem levado a uma expansão de seu uso, tanto em nível nacional, como regional, municipal e até individual. A medida em si descreve o tamanho do impacto de uma população ou atividade sobre natureza, porém sua implicação para políticas públicas e planejamento vem sendo reconhecida, levando diversos países e municípios a colocar em prática e monitorar suas agendas de desenvolvimento sustentável.

Como acontece com muitas ferramentas que se propõem a avaliar sustentabilidade, a Pegada Ecológica recebeu muitas críticas (Levett, 1998; van de Bergh e Verbruggen, 1999; Ayres, 2000; Moffatt, 2000; Rapport, 2000; van Kooten e Bulte, 2000; Venetoulis e Talbert, 2007; Wiedmann e Lenzen, 2007; Lenzen et al., 2007). A maior parte delas está relacionada com as simplificações da Pegada Ecológica na forma de medir a sustentabilidade do consumo e com a visão antropocêntrica. A forma final de apresentação dos resultados torna difícil entender as razões específicas da insustentabilidade do consumo de uma dada população (Rapport, 2000) e a formulação de respostas políticas apropriadas (Ayres, 2000; Moffatt, 2000; Opschoor, 2000; van Kooten e Bulte, 2000).

Apesar dos pontos negativos, a Pegada Ecológica já ocupa lugar de destaque em vários relatórios de grupos ambientais (World Wildlife Fund, Greenpeace) e de setores governamentais relacionados a programas que visam estabelecer metas para uma economia sustentável. Em 2007, a Suíça realizou estimativas de sua Pegada Ecológica através de seu órgão oficial de estatísticas e pretende incorporá-la como método oficial

em seus planos de desenvolvimento sustentável. O método faz parte da agenda de vários governos nacionais como os do Canadá, Inglaterra, Bélgica, Japão, País de Gales e Alemanha, e vem sendo utilizado por empresas privadas, como a BC Hydro (Canadá), o Grupo GPT (Austrália) e o SITA (França), que buscam reduzir seus impactos sobre o meio ambiente. O rápido crescimento de sua popularidade e sua influência ao longo de um período curto motivou várias análises sistemáticas de seus prós e contras. Segundo van den Bergh e Verbruggen (1999), mais flexibilidade deveria ser permitida nos cálculos da Pegada Ecológica e o foco não deveria estar fixo em um valor, mas sim na análise de um cenário que permita avaliar processos mais complexos.

A Análise Emergética é um método mais completo que a Pegada Ecológica sob o ponto de visto ecológico por considerar fluxos de energias adquiridas na produção de produtos e serviços e, especialmente, devido à proposta de hierarquização das energias (transformidades) (Siche, 2007).

Apesar de apresentarem diferenças em seus métodos, tanto a Pegada Ecológica como a Análise Emergética buscam resolver a mesma questão: qual a disparidade entre a oferta de recursos da natureza e a demanda imposta pelas atividades antrópicas sobre o ambiente? Segundo Siche et al. (2005), o índice de renovabilidade da Análise Emergética e os indicadores da Pegada Ecológica apresentam boa correlação estatística.

Um método de convergência envolvendo as duas metodologias, com a finalidade de melhorar a abordagem convencional da Pegada Ecológica, foi proposto por Zhao et al. (2005), aplicado por Chen e Chen (2006) e refinado por Siche (2007). O enfoque proposto por Zhao et al. (2005) é muito interessante, porque introduz alguns conceitos da Análise Emergética, mas não soluciona todas as deficiências encontradas na metodologia convencional. Será possível incluir a Análise Emergética na metodologia da Pegada Ecológica aproveitando os pontos positivos de cada uma delas?

3. HIPÓTESE

A incorporação de novos conceitos e dos procedimentos metodológicos presentes na Análise Emergética permitirá avançar cientificamente no sentido de que a Pegada Ecológica adquira mais robustez e uma visão de fato ecológica.

O uso da metodologia emergética pode melhorar o cálculo da biocapacidade e da pegada de um país. Este novo procedimento pode permitir a incorporação do trabalho ecossistêmico produzido nas regiões ainda não ocupadas pelo homem (desertos, oceanos, zonas congeladas) para ressaltar a importância da sua preservação, sobretudo em termos de mudanças climáticas.

Assim, o método da Pegada Ecológica poderá superar algumas de suas deficiências se tornando mais completo e confiável. Da mesma forma, poderá contribuir positivamente com a metodologia emergética.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. ECONOMIA ECOLÓGICA

Economia Ecológica é uma perspectiva que visa à interdependência e co-evolução entre economia humana e os ecossistemas naturais. O interesse nessa área se justifica a partir das preocupações com os impactos adversos dos processos de crescimento econômico humano sobre os sistemas naturais. Existe uma base material e energética para as relações entre a economia humana e seus ecossistemas, definindo não só a economia em si, mas os processos sociais e estruturais.

A economia ecológica é considerada, portanto, como uma corrente alternativa à economia convencional, e não é apenas um ramo da Teoria Econômica convencional, mas uma revisão a fundo da ciência econômica (Martínez Alier, 1994). Diferentes estudos dentro do enfoque termodinâmico da economia têm contribuído para a conformação da Economia Ecológica. Dentre os estudos tem destaque o trabalho de Georgescu-Roegen (1971) cuja noção de sustentabilidade se vincula à necessidade de considerar as idéias de irreversibilidade e limites nos sistemas produtivos.

O que torna os humanos e sua economia únicos como um sub-ecossistema é sua habilidade de reestruturar e transformar os processos nos ecossistemas de que fazem parte; e em uma magnitude tal que o bem-estar humano pode ser reduzido ou aumentado em função de suas ações. Porém alguns tipos de atividades econômicas, e as vantagens obtidas com elas, podem não ser sustentáveis se os sistemas naturais forem substancialmente degradados ou impactados. O empenho em extrair essas vantagens é motivado pela satisfação das necessidades biológicas básicas e pela aparente infinita busca por prazer através do consumo de bens.

A magnitude dos impactos potenciais de seu próprio bem-estar através de efeitos nos sistemas naturais requer que as decisões humanas sejam guiadas por alguma noção de valor de suas ações e dos impactos sobre os ecossistemas, seja em termos de benefícios ou de custo. Algum tipo de conceito de valor é necessário para atividades racionais da economia humana dentro de seus sistemas naturais (Page, 1977).

Romeiro (2001) argumenta que a análise econômica com base no conhecimento ecológico identifica o sistema econômico como um subsistema de um todo maior que o contém, impondo uma restrição absoluta à sua expansão. Portanto, a economia ecológica implica uma mudança fundamental na percepção dos problemas de alocação de recursos e de como eles devem ser tratados, do mesmo modo que uma revisão da dinâmica do crescimento econômico.

Neste sentido, a Economia Ecológica incorpora conceitos e instrumentos da Economia e da Ecologia, mas reconhece a insuficiência destes para o propósito de uma análise integrada. Deste modo, por ser um campo pluralista e trans-disciplinar, onde se encontram diversas (e mesmo divergentes) abordagens, uma diversidade de formas de como incorporar os princípios biofísicos são propostos. De acordo com Page (1977), a Economia Ecológica busca atingir seu propósito através de cinco princípios básicos:

1. *Modelagem e Ciência*: entender a interdependência entre economia e sistemas naturais, particularmente entre estruturas, processos, e fluxos de material e energia de que cada sistema depende. Isso inclui entender as tolerâncias dos ecossistemas às mudanças induzidas pelos humanos bem como as tolerâncias das economias às mudanças ecossistêmicas.

2. *Condições para Sustentabilidade*: estabelecer condições sobre as economias humanas que permitam que a sustentabilidade e o crescimento do bem-estar humano, estejam condicionados à sustentabilidade do ecossistema de suporte.

3. **Índices, Indicadores e Sinais**: estabelecer índices e indicadores que reflitam os status das economias e ecossistemas relativos à sustentabilidade, e incluir medidas de qualidade econômica e ecossistêmica. Além disso, estabelecer sinais que reflitam os impactos potenciais da atividade humana nas alterações dos processos e estruturas do ecossistema. Segundo Mitchell (1996), um indicador é uma ferramenta que permite a obtenção de informações sobre uma dada realidade. Para Mueller et al. (1997), um indicador pode ser um dado individual ou um agregado de informações, sendo que um bom indicador deve conter os seguintes atributos: simples de entender; quantificação estatística e lógica coerente; e comunicar eficientemente o estado do fenômeno observado. Para Shields et al. (2002), um índice revela o estado de um sistema ou fenômeno. Prabhu et al. (1999) argumentam que um índice pode ser construído para analisar dados através da junção de um jogo de elementos com relacionamentos

estabelecidos. Pode-se dizer também que um índice é simplesmente um indicador de alta qualidade (Khanna, 2000). Sinais seriam fenômenos aparentes por meio dos quais se chega ao conhecimento de suas causas.

4. *Instrumentos, Leis e Instituições*: desenvolver instrumentos, leis e instituições regulatórias que auxiliem as economias humanas a desenvolverem planos de sustentabilidade.

5. *Sistemas Morais*: analisar as implicações dos diversos sistemas morais para a sustentabilidade do bem-estar humano, e destacar os casos em que há aparente incompatibilidade entre sistemas morais e normas de sustentabilidade.

O paradigma da economia ecológica requer o conhecimento de como os ecossistemas e economias funcionam, e como interagem nas diversas escalas espaciais e temporais. Primeiramente, deve-se compreender como os sistemas naturais respondem à atividade econômica, e também como a atividade econômica responde às mudanças ecossistêmicas. Um modelo analítico útil seria uma matriz ecológico-econômica de entradas e saídas: fluxos de material, energia, nutrientes, etc. entre sistemas econômicos e ecológicos seriam quantificados e os impactos de um sistema sobre o outro poderiam ser estabelecidos. Modelos como esse já foram desenvolvidos para a economia somente ou com fluxos energéticos isoladamente para ecossistemas. Porém, pouco progresso foi feito no sentido de avaliar a junção desses dois modelos de forma prática e significativa (Isard, 1972; Daly, 1968; Constanza & Hannon, 1989).

A capacidade de suporte de um ecossistema tem sido proposta para identificar a escala apropriada, e tem sido aplicada em algumas circunstâncias. Um número simples, por exemplo, o número de humanos, não tem significado uma vez que inovação e evolução biológica podem interagir para moderar efeitos adversos de mudanças nos sistemas naturais. Além disso, um padrão de vida humano deve ser especificado para que o conceito de capacidade de suporte seja válido. Um índice geral de intensidade física da economia humana relativa ao sistema natural poderia ser útil, como a estimativa de Vitousek et al. (1986) de que os humanos já se apropriaram de 40% na Produtividade Primária Líquida terrestre (NPP), apesar de não sabermos que nível de apropriação põe em risco o sistema natural.

Atualmente tem aumentado a noção de que uma escala apropriada de atividades econômicas poderia preservar a resiliência dos sistemas naturais responsáveis pela

manutenção da vida (Arrow et al., 1995). Resiliência é a habilidade do ecossistema em receber os impactos sem transformá-los em mudanças catastróficas nas estruturas e processos. Dentro dessa perspectiva, indicadores de perda de resiliência seriam utilizados para medir se a escala das atividades econômicas é muito grande.

Segundo Costanza (1999), indicadores de sustentabilidade da economia são críticos para a análise da economia ecológica. Sustentar um fluxo de entradas requer a manutenção da fonte desses recursos. Usando a analogia do capital natural, uma economia sustentável requereria a subtração dos lucros de uma quantidade necessária para compensar as degradações na qualidade do capital natural. A suposição é de que essas degradações são reversíveis através de investimentos do setor econômico para o natural.

Algum tipo de conceito de valor deve ser estabelecido uma vez que as decisões humanas são baseadas, na maioria das vezes, no ganho ou perda de valores. A valoração pode ser baseada estritamente em preferências individuais, ou de forma mais ampla em preferências sociais. As necessidades básicas físicas e biológicas podem ter valores infinitos em termos individuais, porém valores finitos em termos sociais. A economia ecológica sugere que as preferências são mutáveis e adaptáveis. As valorações de serviços ecossistêmicos usualmente têm uma perspectiva das gerações atuais e propõe um valor que represente a vontade de pagar por esses serviços (Costanza, 1999).

O foco da ecologia econômica requer uma compreensão da adaptabilidade da economia humana. Isso inclui a adaptabilidade de preferências a novas circunstâncias. Além disso, requer o conhecimento dos intercâmbios disponíveis na economia que atendam às necessidades e aos desejos humanos. O conhecimento sobre a formação, velocidade e custos de ajuste para mudanças no mercado de bens e serviços são importantes para entender como a economia se adapta às mudanças no ecossistema (Costanza, 1999).

Resumindo, a Economia Ecológica fundamenta-se no princípio de que o funcionamento do sistema econômico deve ser compreendido tendo-se em vista as condições do mundo biofísico representadas pelos fluxos de energia e de materiais que

alimentam todos os empreendimentos para o funcionamento da economia. Uma vez que o processo econômico é um processo também físico, as relações físicas não podem deixar de fazer parte da análise do sistema econômico.

De maneira geral, na Economia Ecológica variam visões que se aproximam de um extremo mais próximo à ecologia convencional a outras mais próximas à economia convencional. Assim, podem ser encontradas abordagens que utilizam formulações e ferramentas da economia ambiental e economia dos recursos naturais, baseadas na valoração dos bens e serviços ambientais a partir das preferências e utilidades dos indivíduos, expressas em termos monetários (Mitchell e Carson, 1989). De outro lado, podem-se verificar abordagens que buscam realizar análises do sistema econômico a partir de critérios estritamente ecológicos, utilizando a energia como unidade geral de análise do sistema (Odum, 1996).

4.2. CAPACIDADE DE SUPORTE

O *Ensaio Sobre o Princípio das Populações* (Malthus, 1986) contribuiu de forma significativa para as visões do século XIX e XX. A teoria de Malthus sobre o crescimento da população humana pode ser considerada a base para o conceito de capacidade de suporte (Seidl e Tisdell, 1999). Há três considerações básicas feitas por Malthus em sua teoria. A primeira é de que o alimento é necessário para a existência do ser humano e é o único fator limitante ao crescimento populacional. A segunda consideração é de que o crescimento da população humana se dá de forma geométrica, ou seja, exponencialmente (1, 2, 4, 8, 16, 32...). Por fim, Malthus enfatiza que a produção de alimentos pode crescer somente linearmente (1, 2, 3, 4, 5...), o que teoricamente levaria a uma escassez de alimentos.

Apesar de introduzir o conceito de capacidade de suporte, a teoria de Malthus estava incompleta. Considerou “alimento” como o único fator limitante, porém outros obstáculos existem como saúde, energia, moradia. Além disso, sabe-se que a produção de alimentos pode ser realizada de forma mais eficiente.

A idéia de crescimento populacional restringido apenas por limites de recursos naturais foi colocada na forma de equação matemática por Pierre F. Verhulst, Professor

de Matemática em Bruxelas, Bélgica, em 1838 (Verhulst, 1838). Ele verificou a equação através de censos populacionais realizados na França, Bélgica, Rússia e em Essex, na Inglaterra ao longo de 20 anos, no início do século XIX e confirmou seus resultados (Seidl & Tisdell, 1999).

A equação do crescimento logístico:

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(\frac{K - N}{K} \right) \quad (\text{equação 1})$$

onde N é a população, r é a taxa de crescimento e K é a capacidade de suporte.

A existência de um crescimento geométrico permanente foi rejeitada, pois não incluía um limite superior (Hutchinson, 1979). O tipo de crescimento proposto por Malthus só poderia ser observado por curtos períodos de tempo. A equação de Verhulst leva em conta esse limite superior do crescimento populacional (capacidade de suporte K):

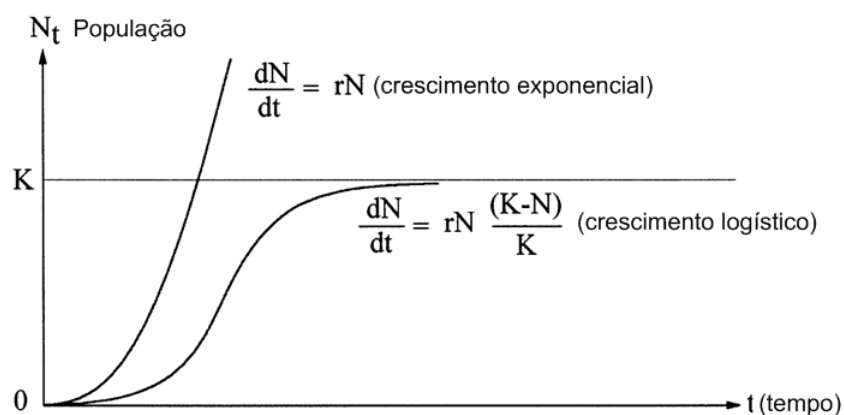


Figura 2: População versus tempo – Crescimentos Exponencial e Logístico

Ecologistas definem capacidade de suporte como o tamanho máximo da população de uma espécie que uma determinada área pode suportar sem reduzir sua habilidade de manter essa mesma espécie por um período indefinido de tempo (Daily e Ehrlich, 1992). Ou seja, o termo refere-se ao limite superior populacional que um ecossistema poderia sustentar com seus recursos e serviços locais, sem que houvesse dano ao meio ambiente e a esses recursos e serviços.

Viver dentro dos limites de um ecossistema depende basicamente de três fatores:

- A quantidade de recursos disponíveis no ecossistema;
- O tamanho da população;
- A quantidade de recursos que cada indivíduo consome.

Além do modelo logístico de Verhulst, a capacidade de suporte pode ser expressa em qualquer modelo que assuma dependência de densidade. A relação estoque-recrutamento (Beverton e Holt, 1957), por exemplo, supõe que o rendimento reprodutivo de uma população aumenta de forma logarítmica até que nascimentos e mortes atinjam o equilíbrio. A capacidade de suporte é o ponto em que a curva se torna assintótica.

Como é virtualmente impossível considerar todas as variáveis que influenciam a capacidade de suporte, usualmente ela é expressa como uma função de determinados recursos fundamentais. Se o primeiro nível trófico é a fonte básica de alimentos, então a capacidade de suporte pode ser estimada através da produtividade primária. Essa medida é utilizada em manejo de plantações (Tilman e Downing, 1994), criação de animais em fazenda (Dijkman, 1999), aquicultura (Shuanglin et al., 1998), pesca (Pauly e Christensen, 1995) e até em dinâmica de populações de mamíferos marinhos (Schell, 2000). Esses modelos consideram apenas o tamanho máximo da população. Todavia, a capacidade de suporte é uma noção de duas vias: os indivíduos (ou biomassa) e os fatores que controlam seu crescimento (Menczer, 1998). Portanto a combinação dos dois elementos refletiria de forma mais completa o que o conceito realmente representa.

Em alguns ambientes, o espaço é o principal determinante da capacidade de suporte (Paine, 1966). A maioria dos ambientes pode ser subdividida tantas vezes quantas forem as classes existentes de organismos (Hutchinson, 1959), fazendo com que a medida do espaço requerido para a vida de uma população seja algo complicado. Caddy e Stamatopoulos (1990) simplificaram o problema usando Teoria Fractal. Eles desenvolveram um habitat artificial com fendas que representavam a disposição dos espaços em recife de corais, e estimaram a capacidade de suporte para algumas populações, expressa como o número de indivíduos de um determinado tamanho por unidade de irregularidade no habitat.

Até mesmo dinâmicas de espécies que não são governadas por dependência de densidade têm uma capacidade de suporte. Nesse caso, fatores físicos ambientais exercem o mesmo efeito potencial em cada membro da população, independentemente de quantos eles sejam (Sissenwine, 1984). Isso pode resultar em biomassa acumulada sendo esporadicamente reduzida por mudanças nas condições ambientais. Esse comportamento intermitente é freqüentemente observado em epidemias.

Uma comunidade também pode aproveitar as oportunidades apresentadas por um novo ambiente. Entretanto, de forma distinta ao crescimento de uma população, que envolve apenas o desenvolvimento agregado de indivíduos, uma comunidade passará por uma série de mudanças estruturais controladas por interações mútuas entre as espécies e o ambiente.

Os primeiros passos para essa “sucessão” são caracterizados por rápido crescimento e por espécies de vida curta cujas taxas de produção excedem a taxa de respiração do sistema. Conforme a sucessão prossegue, essas espécies são substituídas por outras com maior complexidade estrutural e funcional, que utilizam a energia com eficiência progressiva. Isso eventualmente resulta em um estado constante, onde a respiração se iguala à produção primária (Tansley, 1935; Odum, 1969; Margalef, 1974; Christensen e Pauly, 1998). A produtividade per capita da comunidade é muito alta durante as fases iniciais de sucessão, e diminui progressivamente conforme um limite superior para biomassa é atingido (Margalef, 1974), e pode ser expressa como uma curva sigmóide semelhante à curva de crescimento logístico de uma população (Hutchinson e Wollack, 1940), mas caracterizada por estágios ou “passos” (Lindeman, 1942). Se algumas espécies são substituídas progressivamente por outras, os estágios seguintes podem atingir a capacidade de suporte anterior, então, ou essas novas espécies se mantêm limitadas ou eventualmente desaparecem. As espécies que obtêm sucesso tenderão a uma nova capacidade de suporte, cada vez mais próxima à capacidade de suporte do ecossistema (figura 3).

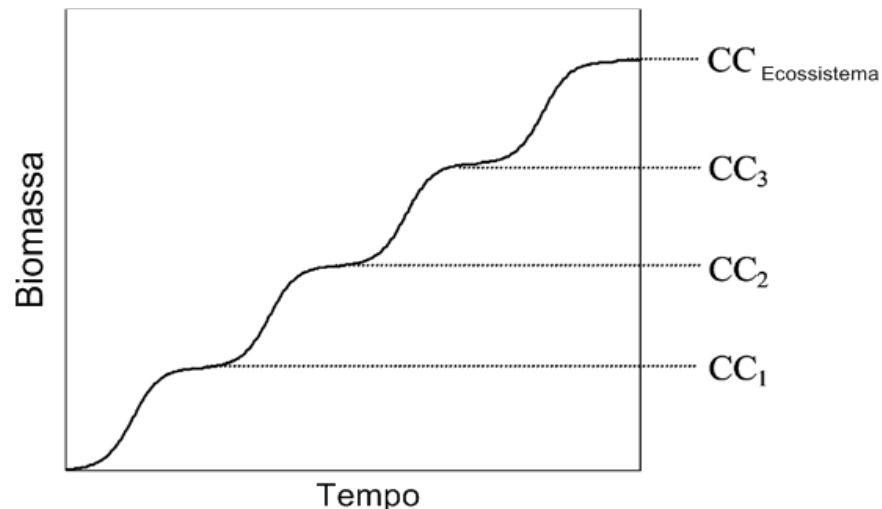


Figura 3: Biomassa versus tempo - Desenvolvimento teórico da biomassa total de um ecossistema durante a sucessão ecológica

Cada estágio é representado pelos degraus na curva, atingindo sua própria capacidade de suporte (CC), mas com uma tendência na direção da capacidade de suporte do ecossistema.

Comunidades aparecem em cada passo da sucessão através da recolonização por espécies de áreas vizinhas, que juntas determinam a diversidade total do ecossistema. A história natural dessa diversidade estabelece uma ligação com a capacidade de suporte, ou seja, o número máximo de espécies que o ecossistema pode suportar. Tanto para populações quanto para comunidades, um ecossistema representa uma base finita de recursos para as espécies que fazem parte do mesmo. Se um habitat ou uma zona adaptativa (Futuyma, 1998) tem relativamente poucas espécies, imigração e diversificação (incluindo a aquisição de inovações evolutivas (Benton, 1995), avançam até que a região atinja o máximo número de espécies suportáveis durante um período de tempo. De fato, a diversificação de espécies através da evolução tem sido ligada ao crescimento logístico da população (Walker e Valentine, 1984). Por analogia, o número de categorias taxonômicas equivale ao número de indivíduos ou biomassa, e a diferença entre as taxas de aparecimento de novas espécies e a extinção, equivale à taxa intrínseca de crescimento. Se o número total de categorias taxonômicas aumenta, o aparecimento de novas espécies diminui e a extinção aumenta, e o equilíbrio é eventualmente atingido.

O equilíbrio da biodiversidade pode ser regulado por fatores físicos como o aquecimento global e mudanças topográficas (Futuyma, 1998), e o desenvolvimento desse equilíbrio pode ser regulado por interações entre espécies. Uma vez que a biodiversidade ecossistêmica atinge o nível de saturação, interações interespecíficas

podem levar a uma exclusão competitiva e a um particionamento dos nichos (Lluch-Belda, 1978). Os recursos que governam a capacidade de suporte de um ecossistema impõem restrições tanto no número de espécies superiores sustentadas, quanto no número de divisões que um nicho pode resistir.

Deste modo, mesmo que a biodiversidade normalmente pareça crescer sem atingir um equilíbrio, o mesmo processo que governa o crescimento logístico deve atuar sobre a diversidade restringindo o crescimento exponencial eventualmente. Há evidências de que haja uma capacidade de suporte da biodiversidade global durante certos períodos na história da Terra (Miller e Sepkoski, 1988; Maley, 1998), mas a tendência geral nos últimos 200 milhões de anos tem sido de um crescimento exponencial no número total de famílias taxonômicas (Futuyma, 1998; Benton, 2001).

A Terra é um sistema praticamente fechado e seus recursos formam uma base finita da qual dependem as atividades humanas (Arrow et al., 1995). O crescimento incessante da população mundial, e a forma como os ecossistemas têm sido explorados para atingir os padrões de consumo, justificam uma reconsideração do conceito de capacidade de suporte para o planejamento do futuro.

Após a teoria de Malthus (1886), a preocupação sobre a expansão da população permaneceu latente por quase 150 anos. Antes de 1960, o desenvolvimento mundial estava profundamente inclinado em direção ao domínio econômico, apesar do fato de as matérias-primas que abastecem a atividade econômica serem derivadas do ambiente natural.

Ehrlich (1968) e o “Clube de Roma” alertaram a opinião pública sobre as possíveis consequências do crescimento da população mundial e da industrialização para a produção de alimentos e exaustão de recursos. Eles concluíram que dentro de 100 anos, o planeta poderia atingir seus limites de crescimento. Através do Clube de Roma, um grupo de estudos comandado por D. L. Meadows conduziu uma série de análises sobre as ameaças à sociedade mundial. Os resultados, publicados em “Os Limites para o Crescimento” (Meadows et al., 1972), foram fortes e profundos, e se tornaram a base para uma nova cultura global de “ambientalismo”. Naquele mesmo ano, as Nações Unidas convocaram a Conferência de Estocolmo, com o objetivo de estabelecer uma fundação

ecológica para controle do meio-ambiente global. Um dos resultados dessa conferência foi a criação do Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP), cujo objetivo é reconciliar o desenvolvimento sócio-econômico e a estabilidade ecológica através de cooperação e regulação internacional.

A capacidade de suporte humano depende de interações complexas entre condições amplas e muitas vezes não relacionadas (Robinson, 1993; Cohen, 1995), e não pode ser caracterizada como um simples declínio do capital natural conforme o número de humanos aumenta. Devido à habilidade humana de aumentar sua capacidade de suporte eliminando outras espécies, importando recursos que estejam faltando e através da tecnologia, a definição clássica de capacidade de suporte parece ser irrelevante. O comércio e a tecnologia são razões utilizadas para rejeitar o conceito de capacidade de suporte humano segundo a definição ortodoxa (Rees, 1996).

Porém é um grande equívoco rejeitar totalmente a definição e os conceitos, pois logo, a diminuição da capacidade de suporte pode se tornar a questão mais importante que a humanidade terá que enfrentar. A razão para isso se torna clara quando se define capacidade de suporte não como a máxima população, mas como a máxima “carga” que pode ser imposta ao ambiente de forma segura pelo homem. A carga humana não é apenas uma função da população, mas também do consumo per capita, que vem aumentando de forma significativa (Rees, 1996). Como Catton (1986) observa: “O mundo está tendo que acomodar não somente mais pessoas, mas efetivamente pessoas ‘maiores’...” Por exemplo, em 1790 a média diária de consumo de energia de um americano era 11.000 kcal. Em 1980, essa média subiu para 210.000 kcal/dia (Catton, 1986). Como resultado dessa tendência, a pressão relativa da capacidade de suporte está crescendo mais rápido do que o mero aumento populacional.

A capacidade de suporte humano, portanto, varia tanto com a disponibilidade de recursos quanto com aspectos culturais e níveis de desenvolvimento econômico. Existem duas medidas da capacidade de suporte humana: capacidade de suporte biofísica e a capacidade de suporte social. A capacidade de suporte biofísica é a população máxima que pode ser mantida com os recursos do planeta a uma dada tecnologia. A capacidade de suporte social é a capacidade de suporte biofísica sustentável com certa organização social, incluindo padrões de consumo e comércio. Portanto a capacidade de suporte

social deve ser menor que a biofísica, pois ela leva em conta a qualidade de vida e estima o número de pessoas que podem ser mantidas a um padrão de vida definido. As dimensões sociais da capacidade de suporte incluem aspirações de estilos de vida, padrões de distribuição de recursos socialmente controlados, disparidade entre custos privado e social, a dificuldade em formular políticas racionais na face da incerteza e vários outros aspectos da organização humana sociopolítica e econômica (Daily e Ehrlich, 1992).

A fim de se estimar uma população humana sustentável, padrões de vida e níveis de consumo são variáveis importantes para os cálculos. Uma população mundial muito grande poderia ser mantida com um baixo nível de consumo de alimentos. Porém o resultado poderia ser uma população instável socialmente. Uma capacidade de suporte social sustentável deve ser baseada em um nível de consumo que atenda às necessidades básicas de alimentos, água e espaço e que também ofereça direitos sócio-políticos, saúde, educação e bem-estar (Daily e Ehrlich, 1996).

Estudos biológicos de mudanças em populações mostram que, uma vez que a capacidade de suporte de um ecossistema é excedida, uma queda ou colapso da população ocorre em seguida, juntamente com uma rápida degradação ambiental (Hardin, 1986). Uma consequência comum para uma população animal que excede sua capacidade de suporte biofísica local é um declínio populacional, ocasionado por uma combinação de aumento da mortalidade, redução da fertilidade e emigração, onde possível (Klein 1968, Mech 1966, Scheffer 1951).

4.3. SUSTENTABILIDADE

Um processo sustentável é aquele que pode ser mantido sem interrupção, enfraquecimento ou perda de valores importantes. Sustentabilidade é uma condição necessária e suficiente para que uma população esteja no limite ou abaixo da capacidade de suporte (Daily e Ehrlich, 1992). De acordo com a definição do relatório Brundtland de 1987, o desenvolvimento sustentável pode ser definido como “desenvolvimento que atende às necessidades e aspirações do presente sem comprometer a habilidade de futuras gerações suprirem suas próprias necessidades”. É importante mencionar que as definições do relatório Brundtland são explicitamente antropocêntricas. No entanto, quase

todos os propósitos práticos da proteção ambiental podem ser justificados com uma definição antropocêntrica de sustentabilidade (Rennings e Wiggering, 1997).

A classificação de uma sociedade sustentável tem sido amplamente definida através dos critérios “forte” ou “fraca”. Enquanto os dois buscam assegurar o melhor futuro possível em termos de bem-estar humano, a sustentabilidade forte constrói a suposição de que o capital natural é insubstituível e, portanto, essencial. A sustentabilidade forte defende a manutenção do capital natural, independente do desenvolvimento das formas de capital humano. O conceito de sustentabilidade fraca se baseia na teoria da economia neoclássica e considera que os capitais naturais e manufaturados são substitutos equivalentes. Ou seja, assume que o bem-estar humano é alcançado se o valor de todos ativos combinados forem preservados, em vez de dar atenção a manter o capital natural, uma vez que a tecnologia poderia substituir os serviços ecológicos perdidos (Pearce et al., 1989).

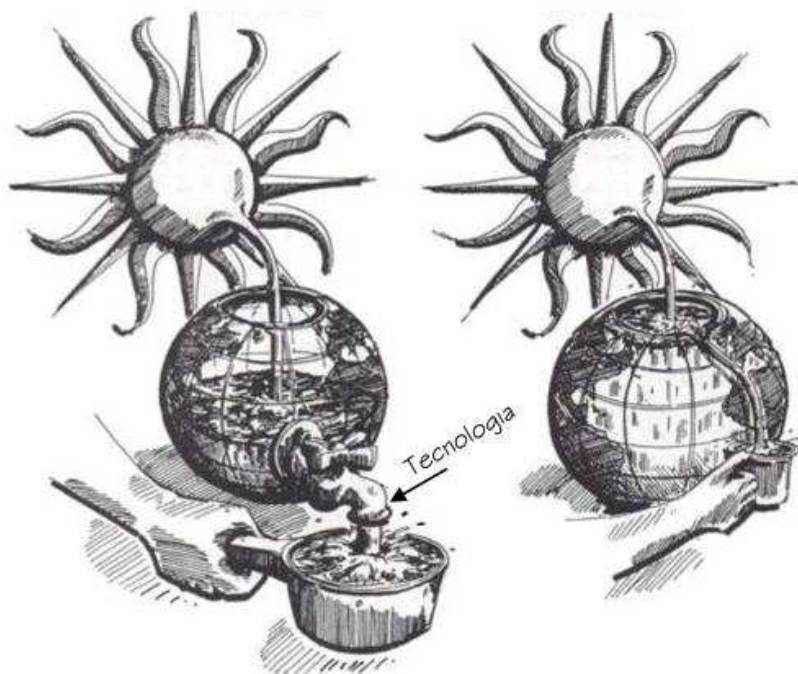


Figura 4: Uso Sustentável: Analogia do balde de água

Imagine um balde sendo cheio com água a uma taxa fixa. A água no balde é o estoque que só pode ser retirado na mesma taxa que o balde é cheio. Essa seria uma taxa sustentável. De forma similar, a natureza é o balde que é continuamente alimentado pelo sol: fotossíntese produz matéria orgânica, a base para todo o capital biológico. Sustentabilidade implica na utilização do capital natural na mesma taxa em que ele é produzido. No entanto, comércio e tecnologia possibilitaram a exploração progressiva da natureza além dos níveis sustentáveis. Isso faz com que futuras gerações tenham um capital natural de menores qualidade e produtividade.

Fonte: Wackernagel e Rees (1996)

Por definição, não existe taxa de consumo sustentável para recursos não-renováveis. A principal dificuldade no uso de recursos não-renováveis não é a exaustão imediata (pois normalmente as quantidades são enormes), mas as dificuldades técnicas, econômicas, ambientais e sociopolíticas associadas com o declínio da qualidade dos recursos e a transição para os substitutos (Holdren, 1991).

À primeira vista, pode parecer que os estoques e fluxos de recursos renováveis demandariam menos esforços para ser mantidos simplesmente porque são gerados para nós pela natureza. No entanto, o aumento da demanda humana no ambiente biofísico dificulta limitar o uso de muitos recursos renováveis a uma taxa sustentável (Daily e Ehrlich, 1992).

Uma solução para o crescimento da população seria uma substituição entre “tamanho de população” e “uso de recursos per capita”, uma vez que o produto desses dois fatores é limitado por obstáculos biofísicos. Sustentabilidade seria compatível com uma grande população vivendo a níveis baixos de uso de recursos per capita, ou uma população pequena vivendo a níveis altos de uso de recursos per capita. Em muitos países os níveis de consumo de recursos estão abaixo da auto-suficiência e mesmo assim a capacidade de suporte ecológica já foi excedida (por exemplo: Haiti e El Salvador). Nesses casos, o controle populacional é uma pré-condição, ao invés de ser uma consequência do desenvolvimento sustentável (Daly, 1990).

O desenvolvimento sustentável não limita o uso da tecnologia. Novas tecnologias podem trazer efeitos positivos ou negativos. Tecnologias que aumentam a produtividade do recurso podem reduzir a pressão sobre os estoques de capital natural. Tecnologias que aumentam a produtividade de capital manufaturado e do trabalho freqüentemente requerem o processamento de um maior fluxo de recursos e, portanto, tendem a reduzir a produtividade do recurso. Historicamente, o progresso tecnológico tem favorecido a produtividade de capital e de trabalho ao custo da produtividade do recurso. O desenvolvimento sustentável leva a uma direção oposta desse tipo de progresso técnico: um progresso que consiga mais serviços por unidade de recurso, ao invés de um que apenas utilize mais recursos para operar o sistema (Daly, 1990).

Definir sustentabilidade em termos ecológicos é bastante simples (Costanza e Patten, 1995): *“Um sistema sustentável é aquele que sobrevive ou permanece.”*

Biologicamente, isso significa evitar a extinção, e viver para sobreviver e se reproduzir. Economicamente, isso significa evitar colapsos, resguardar-se contra instabilidades e descontinuidades. Sustentabilidade, por definição, está sempre ligada à temporalidade e, em particular, à longevidade. O problema com a definição anterior é que as determinações só podem ser feitas *após o fato*. Um organismo vivo é saudável até quando sua progenia sobreviver e contribuir para os genes de futuras gerações. Portanto, o cálculo do quão saudável está esse organismo hoje deve esperar até o amanhã. O cálculo da sustentabilidade deve também esperar até após o fato (Costanza, 1999).

O que normalmente se define como sustentabilidade são, portanto, previsões de ações que ocorrem no momento e que poderiam levar à sustentabilidade. Por exemplo, manter as taxas de extração de um sistema de recursos abaixo das taxas de renovabilidade natural poderia levar a um sistema de extração sustentável – mas isso é uma previsão apenas, não uma definição. Isso é, na verdade, a base da teoria MSY (Maximum Sustainable Yield: Produtividade Sustentável Máxima), que por muitos anos tem sido o princípio do manejo da vida selvagem e de viveiros de peixes (Roedel, 1975).

Como aprendido nesses campos, um sistema só pode ser considerado sustentável após um determinado tempo de observação em que as previsões se confirmem e se mantenham. Normalmente existe muita incerteza em estimar taxas de renovabilidade natural. O segundo problema é que quando se diz que um sistema atingiu a sustentabilidade, não significa por um tempo infinito, mas um período que seja consistente com as escalas de tempo e de espaço (Costanza, 1999).

Espera-se que uma célula de um organismo tenha um ciclo de vida relativamente curto, o organismo um pouco maior, as espécies, maior ainda, e o planeta um grande período de tempo. Porém nenhum sistema (nem mesmo o universo) tem uma duração infinita. Um sistema sustentável nesse contexto é aquele q atinge a máxima expectativa de duração. Em termos de população, a média de expectativa de vida normalmente é usada como um indicador da saúde e bem-estar dos humanos, mas a população em si tende a ter uma duração maior do que qualquer indivíduo.

Como os ecossistemas passam por sucessões como resultado de mudanças nas condições climáticas e transformações internas, eles têm uma duração limitada (apesar de muito longa). A chave é diferenciar mudanças devido aos limites do ciclo de vida e mudanças que reduzem a duração do sistema. A eutrofização de sistemas aquáticos induzida por humanos causa uma mudança radical na natureza do sistema (acabando com a vida do sistema mais oligotrófico ao mesmo tempo em que inicia um sistema mais eutrófico). Assim esse processo deveria ser chamado de “insustentável”, utilizando a definição anterior, uma vez que o ciclo de vida do primeiro sistema foi reduzido de uma forma não-natural. Ele poderia ter se tornado eutrófico naturalmente, mas a ação antrópica fez com que essa transição ocorresse mais “cedo” (Costanza, 1999).

Sistemas ecológicos são o melhor exemplo de modelo de sistemas sustentáveis. A melhor compreensão desses sistemas e de como eles funcionam e se mantêm podem auxiliar na arquitetura e administração de subsistemas econômicos sustentáveis. Por exemplo, em ecossistemas maduros todos os resíduos e subprodutos são reciclados e utilizados de alguma forma no próprio sistema ou totalmente dissipados. Isso implica que uma característica de sistemas econômicos sustentáveis deveria ser um “fechamento do ciclo” similar através do uso produtivo e reciclagem de energia e material descartados, ao invés de simplesmente estocá-los, diluí-los ou mudá-los de estado, impedindo que afetem negativamente outros ecossistemas ou sistemas econômicos que não podem utilizá-los de forma efetiva (Costanza, 1999).

Historicamente, o primeiro subproduto, ou “poluente”, da atividade de uma parte do sistema que teve um efeito negativo em outra parte foi provavelmente o oxigênio, um subproduto não-intencional da fotossíntese que era danoso à respiração anaeróbica. Havia tanto oxigênio que a atmosfera terrestre eventualmente se tornou saturada e novas espécies evoluíram de forma a utilizar esse subproduto como algo produtivo na respiração aeróbica. Portanto, a biosfera representa um equilíbrio entre esses processos que evoluíram durante milhões de anos para assegurar que os subprodutos fossem absorvidos de forma integral pelos processos do sistema.

4.4. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

Desde a publicação do Relatório Brundtland (1987), tem ocorrido um debate global sobre a sustentabilidade da economia mundial e do meio ambiente. Ainda assim, pouco dessa preocupação foi traduzida e materializada na forma de mudanças estruturais dos processos e das instituições que governam as relações entre sociedade e ambiente. Desde então, tornou-se evidente que os conceitos de sustentabilidade e de desenvolvimento sustentável são tão complexos quanto os problemas que eles visam solucionar. No entanto, parece haver um consenso geral de que a ciência desempenha um papel importante nos esforços para assegurar um futuro sustentável: a ciência ajuda a revelar a complexa cadeia de causa e efeito entre atividades humanas e impactos ambientais e auxilia na identificação dos melhores métodos de administração dos mesmos. Infelizmente, o papel desempenhado pelos cientistas contribuiu para a crença de que a sustentabilidade é fundamentalmente uma questão científica e, portanto, de resolução também científica. As questões referentes a indicadores de sustentabilidade se tornam mais desafiadoras e controversas quando se analisam as interações entre pessoas e ambientes onde vivem (McCool e Stankey, 2004).

É de consenso geral que o desenvolvimento sustentável é um processo evolutivo que se traduz na combinação de três vertentes de desenvolvimento de um país para benefício das gerações presente e futura: crescimento da economia, melhoria da qualidade do ambiente e melhoria da sociedade (figura 5).



Figura 5: Sociedade, Natureza e Economia e o desenvolvimento sustentável

À medida que o conceito de desenvolvimento sustentável é cada vez mais interiorizado pelas instituições, torna-se necessário avaliar o desempenho das economias com base em um novo conceito e não apenas em indicadores como o PIB (Produto Interno Bruto). Para aplicar o conceito de desenvolvimento sustentável torna-se fundamental o estabelecimento de indicadores, objetivos e metas que possam dar a medida do desempenho de um país em matéria de sustentabilidade.

Assim, indicadores são parâmetros selecionados e considerados isoladamente ou combinados entre si, sendo especialmente úteis para refletir sobre determinadas condições dos sistemas em análise. Conceitualmente, indicadores desempenham três papéis importantes nas avaliações de sustentabilidade. Primeiro, eles auxiliam a descrever as condições de sistemas complexos e interdependentes. Segundo, dependendo dos mecanismos de realimentação, os indicadores facilitam a avaliação de desempenho de várias formas de administração e políticas implementadas para atingir a sustentabilidade. Terceiro, eles alertam os usuários para mudanças nos sistemas sociais, culturais, econômicos e ambientais (McCool e Stankey, 2004). Essas três funções são fundamentais para se entender sua seleção e seu uso.

Indicadores são úteis na descrição das condições atuais (quantidade ou magnitude de algo) e do desempenho de um sistema. Nesse sentido, eles fornecem a linguagem comum para descrever um sistema particular, o que é necessário para uma

comunicação efetiva e clara entre os interesses. Bossel (1999) afirma que “Aprender a lidar com um sistema complexo significa aprender a reconhecer um conjunto específico de indicadores e interpretar o que os resultados significam para a saúde, ou viabilidade, do sistema”.

Além disso, indicadores fornecem uma medida da efetividade das ações e políticas através das quais busca-se atingir um estado sustentável. Tais indicadores não se propõem a descrever um sistema, mas sim em revelar a resposta a um dado tratamento ou intervenção em relação a um objetivo específico. Por exemplo, se o objetivo é conservar o estoque de capital natural, buscam-se indicadores que possam avaliar mudanças nesses estoques como o resultado de uma ação. Assim, para cumprir essa função, os indicadores devem ter a habilidade de medir as relações de causa e efeito. Além de quantificar a magnitude de um estoque, um indicador deve também ser capaz de medir a taxa de mudança nesse estoque (Bossel, 1999). Essa medida é especialmente útil para se entender dinâmica de sistemas.

Portanto para entender e administrar sistemas complexos (como os sistemas ecológicos e econômicos) é necessário uma forma de medir o desempenho geral do sistema. Todos os sistemas complexos são, por definição, compostos por um número de partes interativas. Em geral, esses componentes variam em tipo, estrutura e função dentro do sistema como um todo. Desta maneira, o comportamento de um sistema não pode ser resumido apenas pela soma dos comportamentos individuais das partes. Da mesma forma, o estado de um organismo não pode ser suposto como uma soma dos estados individuais, uma vez que seus componentes são por si só complexos e têm funções diferentes e não-comensuráveis dentro do sistema total (Costanza, 1999).

Definições de um ecossistema “saudável” incluem:

- Homeostase;
- Ausência de doenças;
- Diversidade ou complexidade;
- Estabilidade ou resiliência;
- Vigor ou espaço para crescimento;
- Equilíbrio entre os componentes do sistema.

Segundo Costanza (1999), todos esses conceitos representam um quebra-cabeça, mas nenhum é compreensivo o bastante para servir ao propósito de indicar a sustentabilidade. Ele desenvolveu o conceito de ecossistema saudável como *uma medida hierárquica abrangente, multi-escalar e dinâmica, da resiliência, da organização e do vigor de um sistema*. Esses conceitos estão incorporados no termo “sustentabilidade”, que significa a habilidade de um sistema manter sua estrutura (organização) e função (vigor) ao longo do tempo enfrentando estresses externos (resiliência).

Um sistema deve ser definido também de acordo com o contexto em que está inserido (o sistema maior do qual faz parte) e seus componentes (os sistemas menores que o compõem). De forma simples, a saúde de um ecossistema é a medida do desempenho total de um sistema complexo, composta pelo comportamento de suas partes.

Tais medidas da saúde do sistema devem envolver uma espécie de soma ponderada ou uma operação mais complexa, onde os fatores incorporem a importância relativa de cada componente para o funcionamento do todo. Esse cálculo de importância relativa incorpora “valores”, que podem variar de subjetivos e qualitativos a objetivos e quantitativos, conforme se obtém mais conhecimento sobre o sistema em estudo.

Definições e indicadores operacionais são um pré-requisito para a implementação prática do conceito de sustentabilidade. Apesar da definição geral de sustentabilidade estar presente em todas as áreas da economia ecológica e desenvolvimento social, três regras de uso de recursos surgiram a partir dela (Daly, 1990; Pearce e Turner, 1990):

- A taxa de uso dos recursos renováveis não deve exceder a taxa de regeneração dos mesmos;
- A emissão de resíduos não deve exceder a capacidade assimilativa dos ecossistemas;
- Os recursos não-renováveis devem ser explorados de uma maneira “sustentável” limitando a taxa de esgotamento à taxa de criação dos substitutos renováveis.

As três regras acima caracterizam o uso sustentável dos recursos naturais. Por isso, os indicadores de sustentabilidade devem refletir o quanto o uso atual de recursos

naturais está distante do objetivo. Os passos principais para a criação de tais indicadores são (Opschoor e Reijnders, 1991):

- Identificação dos elementos principais do capital natural e de suas funções econômicas;
- Seleção dos elementos mais importantes para fazerem parte da série de indicadores. Apesar dos níveis de importância não serem conhecidos em todos os casos, deve haver um processo de pesquisa para determinar prioridades;
- Os padrões devem ser orientados pelas regras de uso sustentável de recursos;
- Construção de indicadores refletindo a situação atual do meio ambiente em relação aos padrões de sustentabilidade.

Os economistas neoclássicos identificam o uso ineficiente dos recursos naturais como razão principal para os problemas ambientais. Essa ineficiência seria causada por falhas de mercado devido a efeitos externos. A estratégia econômica visa obter o preço correto. Os custos externos são estimados por diferentes métodos e a idéia é de internalizar esses custos.

A estratégia ecológica analisa os impactos de atividades econômicas em sistemas ecológicos. Essa estratégia visa manter os ecossistemas intactos protegendo as habilidades naturais como a estabilidade ecológica ou resiliência ecológica. Indicadores derivados da estratégia ecológica são medidos em unidades físicas. Os indicadores físicos que quantificam os limites das funções ecológicas críticas podem ser caracterizados como indicadores da sustentabilidade forte, porque eles negam o nível de substituição que a sustentabilidade fraca assume (Victor et al., 1994).

Apesar das abordagens econômicas e ecológicas serem complementares no que diz respeito à medida do desenvolvimento sustentável, até agora houve pouco êxito no vínculo dos dois conceitos ou na determinação da fronteira entre ambos. No entanto, deveria haver essa ligação para uma medida mais apropriada da sustentabilidade, pois todas as abordagens econômicas e ecológicas têm deficiências. Os conceitos de indicadores econômicos e ecológicos têm propósitos diferentes e não podem ser medidos pelos mesmos critérios (Rennings e Wiggering, 1997).

4.5. EMERGIA E ANÁLISE EMERGÉTICA

Definida como a disponibilidade de energia de um tipo que é utilizada em transformações diretas ou indiretas para produzir um produto ou serviço medida em emjoule (Odum, 1983, 1988, 1994, 1996), a emergia reflete a “memória energética” do trabalho anteriormente realizado para produzir esse mesmo produto ou serviço. Logo, a emergia representa um valor diferente daquele normalmente utilizado para certos bens ou serviços (Brown e Ulgiati, 1997; Sciubba e Ulgiati, 2005). Na economia convencional, o preço econômico de um produto mede o trabalho humano agregado, porém não considera a contribuição da natureza na formação dos insumos utilizados, o custo das externalidades negativas no sistema regional e nem as despesas resultantes da exclusão social gerada pelo empreendimento e pagas pela sociedade local (Ortega, 2002).

Seleção natural e padrões evolucionistas estão implícitos no conceito, uma vez que o caminho de produção é visto como um processo de tentativa e erro baseado no princípio de máxima potência originado da Teoria de Darwin sobre seleção natural e da Hipótese de Lotka de seleção natural como um processo que incorpora o máximo de energia (Odum e Pinkerton, 1955; Sciubba e Ulgiati, 2005). Assim, a metodologia emergética é uma espécie de cálculo de energia equivalente que apresenta ótimo desempenho quando se avaliam sistemas ecológicos de larga escala.

O valor econômico, segundo Odum, é transformado para emergia solar, considerando o fato que dinheiro e energia fluem em direções opostas na economia. Fluxos de recursos que não são trocados no mercado, incluindo recursos renováveis da radiação solar, precipitação, vento, onda, etc são internalizados na produção econômica e valorados pela emergia. Além disso, trabalho, cultura e informação, podem ser contabilizados em termos das contribuições necessárias para serem gerados.

Para reconhecer a qualidade e funcionalidade de cada tipo de energia, que depende de trabalho prévio de geração do recurso, definiu-se um fator de conversão chamado de transformidade. Os sistemas da natureza e a humanidade são partes de uma hierarquia de energia universal e estão imersos em uma rede de transformação de energia que une os sistemas pequenos a grandes sistemas e estes a sistemas maiores. A transformidade mede a qualidade de energia e sua posição na hierarquia de energia

universal, ou seja, quanto maior a transformidade de um recurso mais longe da origem ele estará, pois há muito valor agregado embutido nele. Transformidade é definida como a quantidade de energia de um tipo requerida direta ou indiretamente para gerar uma unidade de energia de outro tipo (Odum, 1988). A unidade da transformidade é o emJoule solar/Joule ou emJoule solar/g.

A transformidade de um produto é calculada somando-se todas as entradas de energia do processo e dividindo-se pela energia proveniente do produto. Quanto maior o número de transformações de energia necessárias para a elaboração de um produto ou a execução de um processo, maior será o valor de sua transformidade. Sendo assim, maior a importância que o recurso pode ter para os ecossistemas e para os seres humanos (Comar, 1998).

Energia (seJ) = Energia Disponível de um Ítem (J) x Transformidade (seJ/J) (equação 2)

A Análise Emergética analisa os fluxos de energia e materiais nos sistemas dominados pelo homem. A metodologia estima valores das energias naturais, incorporadas aos produtos, processos e serviços, geralmente não contabilizadas na economia clássica. Por meio de indicadores (índices emergéticos), a abordagem desenvolve uma imagem dinâmica dos fluxos anuais dos recursos naturais e dos serviços ecossistêmicos providos pela natureza para a geração de riqueza e o impacto das atividades antrópicas nos ecossistemas.

A metodologia emergética, por identificar e quantificar a contribuição dos recursos naturais, permite a compreensão dos limites em cada ecossistema, possibilitando o estabelecimento de metas para garantir a capacidade de suporte e, portanto, a sustentabilidade (Cavalett, 2004).

As repercussões da avaliação emergética se encontram hoje, principalmente no campo do planejamento regional, em relação ao uso da terra, alocação de percentagens de áreas para determinados cultivos e áreas de preservação e na determinação dos parâmetros para identificar prioridades para desenvolvimento de agroindústrias numa escala adequada à realidade cultural, sócio-econômica da população e à capacidade de suporte dos agroecossistemas (Comar, 1998).

A Análise Emergética é realizada em três etapas: (a) análise dos fluxos energéticos de entrada e saída do sistema; (b) obtenção dos índices emergéticos; (c) interpretação dos índices emergéticos. O método geral para emprego da síntese emergética é descrito por Odum (1996) e Odum et al. (2000).

A análise se inicia através da identificação de seus componentes principais, as entradas e saídas de um sistema. A etapa seguinte consiste em produzir um diagrama que represente o processo. Isto permite um melhor entendimento e visualização do sistema como um todo. Na figura 3 são mostradas as contribuições da natureza (I) composta de recursos não-renováveis (N) e de renováveis do meio ambiente (R); e entradas da economia (F) desmembradas em materiais (M) e serviços (S) comercializados. A proposta do diagrama sistêmico é conduzir um inventário crítico dos processos, estoques, e fluxos que são importantes para o sistema sob estudo, os quais serão então valorados. Os componentes e fluxos do diagrama são ordenados da esquerda para a direita, de maneira que à esquerda estão representados os fluxos com maior energia disponível; para a direita existe um decréscimo deste fluxo com cada transformação sucessiva de energia (Odum et al., 2000).

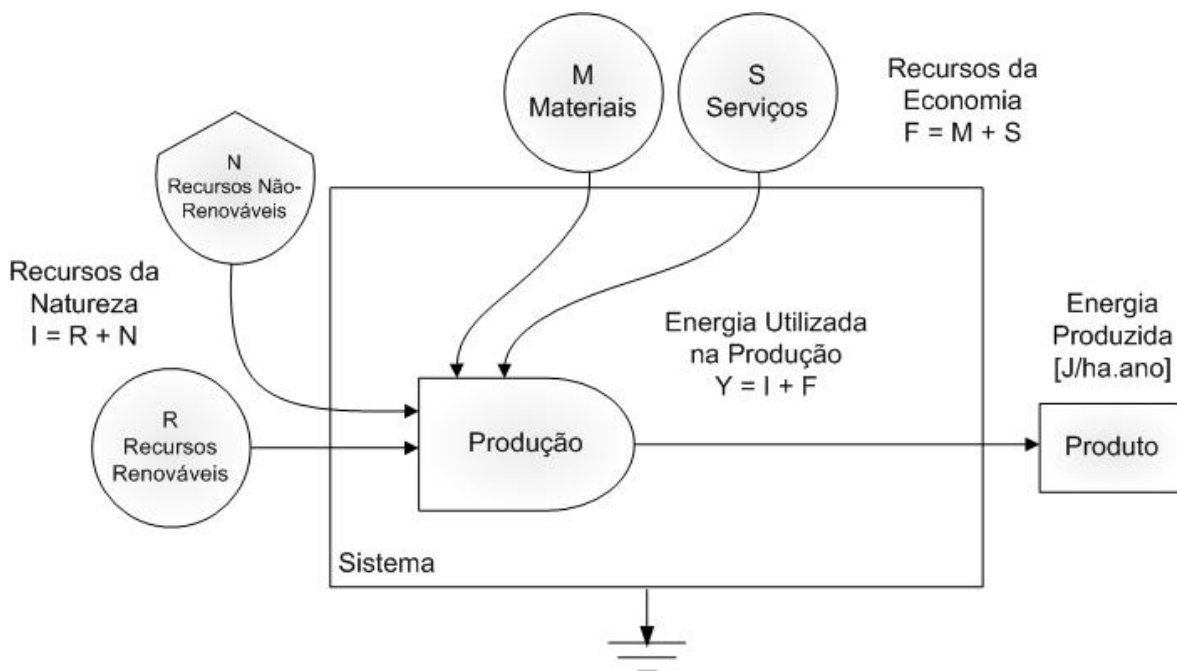


Figura 6: Diagrama simplificado de fluxos de energia para cálculo dos índices emergéticos

A partir da construção do diagrama é elaborada uma tabela de cálculo dos fluxos de energia, que contem os dados reais de fluxos de materiais, trabalho, e energia. As informações primárias de fluxos e reservas de estoques são convertidas em unidades de energia e então somadas para obter a energia total do sistema. O esquema de organização da tabela segue o seguinte modelo:

Nota Descrição	Fluxo Energético	Unidade J, kg ou \$	Transformidade seJ/unidade	Fluxo de Energia seJ/ha.ano
R: Recursos Renováveis				
N: Recursos Não-Renováveis				
M: Materiais da Economia				
S: Serviços da Economia				

Tabela 1: Modelo de Tabela para Cálculo dos Fluxos de Energia

A coluna I fornece o número de referência e a descrição do item, que são a nota de rodapé de página onde se dão os detalhes do cálculo.

A coluna II contém o valor numérico de cada fluxo de entrada. No caso de um sistema em estado estacionário ou em equilíbrio dinâmico, são necessários os valores anuais das contribuições da natureza e da economia. Devem-se incluir os fluxos necessários para manter as estruturas e armazenamento internos do sistema;

Na coluna III são colocadas as unidades usuais para materiais (grama ou quilogramas), para energia (Joules), para dinheiro (\$), etc.

A coluna IV contém valores de transformidade ou energia específica obtidos à partir de estudos anteriores e que constam na fonte de informação citada para essa linha na nota ao pé da página.

A coluna V contém os fluxos de energia. São os produtos obtidos da multiplicação dos fluxos de entrada (em unidades/área.tempo) da coluna II, pelos valores de

transformidade da coluna IV. O valor obtido corresponde ao fluxo de energia ou potencial emergético, que é expressado em emjoules solares por ano. No caso dos serviços, o fluxo é dado em unidades de \$/área.tempo. O dinheiro é convertido em dólares segundo a taxa de câmbio do país, depois este valor é multiplicado pela proporção energia/dinheiro característicos da economia do país por ano.

ÍNDICES EMERGÉTICOS

A metodologia emergética apresenta a vantagem de possuir indicadores que são úteis para interpretar a dependência ou não de um sistema quanto aos recursos da economia e da natureza, podendo assim, promover um diagnóstico de quais sistemas ou processos são mais sustentáveis do ponto de vista ambiental (Odum, 1996):

i) Transformidade: valor que avalia a qualidade do fluxo de energia. A transformidade é obtida dividindo-se o valor da energia requerida para obtenção do produto (Y) ou serviço pela energia do produto ou serviço (E).

$$Tr = Y / E \quad \text{(equação 3)}$$

ii) Renovabilidade Emergética: é o valor da razão entre a energia dos recursos renováveis (R) utilizados e a energia total utilizada no sistema (Y).

$$\%R = (R / Y) \times 100 \quad \text{(equação 4)}$$

iii) Razão de Rendimento Emergético (*Emergy Yield Ratio*): é a razão obtida pela divisão do valor da energia do produto ou serviço (Y) pela energia das entradas originadas da economia (F). Esta proporção indica se o processo pode competir com outros no fornecimento de energia primária para a economia.

$$EYR = Y / F \quad \text{(equação 5)}$$

iv) Razão de Investimento Emergético (*Emergy Investment Ratio*): mede a proporção de energia das entradas do setor econômico (F) em relação às entradas do meio ambiente (I). Este índice mede o quão econômico é o processo ao usar os investimentos

da economia em comparação com outras alternativas existentes na região. Se a razão de um processo apresentar um valor de EIR superior em relação aos outros processos, ele terá menos chances de subsistir, pois apresenta maiores custos de produção e utiliza menos os recursos gratuitos da natureza.

$$EIR = F / I \quad \text{(equação 6)}$$

v) Razão de Intercâmbio Emergético (*Emergy Exchange Ratio*): é a proporção de emergia recebida (Y) em relação à emergia concedida em uma transação comercial. As matérias-primas, minerais e produtos rurais tendem a ter um alto valor de EER quando são comprados a preço de mercado. O índice é encontrado através da multiplicação da relação emergia/dinheiro (chamado de emdólar e cuja unidade é seJ/US\$) pelo dinheiro recebido pela venda (US\$). Esse índice avalia se o produtor está recebendo toda a emergia necessária para a produção na venda dos produtos.

$$EER = Y / [\text{produção unitária} \times \text{preço} \times (\text{emergia/dólar})] \quad \text{(equação 7)}$$

$$\text{Emdólar (seJ/\$)} = \text{Emergia do sistema (seJ/ano)} / \text{PIB do país (\$/ano)} \quad \text{(equação 8)}$$

vi) Razão de Carga Ambiental (*Emergy Loading Ratio*): esta razão indica a quantidade de emergia, não-renovável ou não disponível localmente, que ingressa em uma economia. Quanto maior o uso de emergia renovável por uma economia ou processo produtivo, menor o ELR. Conseqüentemente, economias e processos produtivos que são altamente dependentes de recursos emergéticos de fora tem altos ELR's. Portanto, o ELR indica a pressão que um processo coloca nos ecossistemas locais devido à importação da energia e dos materiais que não são nativos, e é assim uma medida geral do stress do ecossistema devido à atividade econômica.

$$ELR = (N+F) / R \quad \text{(equação 9)}$$

4.6. PEGADA ECOLÓGICA

Recentemente, a Pegada Ecológica (abreviada como EF de “*Ecological Footprint*”) tem sido sugerida não só como conceito, mas também como um método que pode gerar uma avaliação de sustentabilidade de forma objetiva, agregada, não tendenciosa e com indicadores unidimensionais (Wackernagel e Rees, 1996).

A metodologia tem o foco voltado para as atividades humanas que dependem dos serviços naturais ou que comprometem essa habilidade de fornecimento de serviços. Como tanto os recursos renováveis quanto a absorção do impacto humano na natureza dependem da saúde e integridade dos ecossistemas, a capacidade regenerativa é considerada um indicador da habilidade natural de suporte da vida no planeta (Monfreda et al., 2004). A fim de se rastrear a demanda humana sobre esses serviços, foram desenvolvidos cálculos para se estimar o quanto da capacidade regenerativa da biosfera é utilizada pela economia humana.

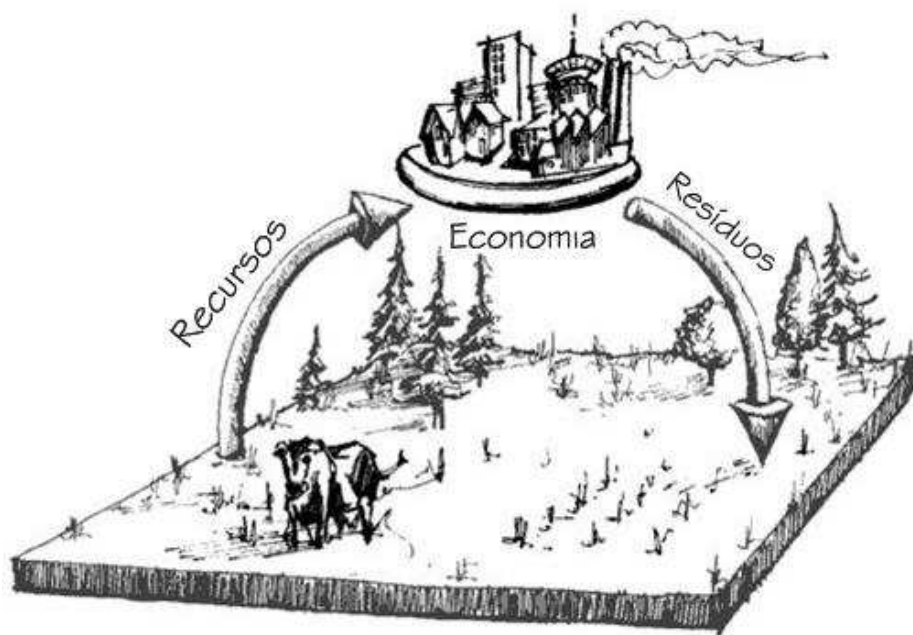


Figura 7: Relação Recursos-Economia-Resíduos na Pegada Ecológica

Pense em uma economia tendo uma espécie de “metabolismo industrial”. Nesse sentido, a economia seria como o gado na pastagem. A economia precisa consumir recursos, que eventualmente vão se tornar resíduos e deixar o organismo. Então a questão é: qual deve ser o tamanho dessa pastagem para suportar essa economia (produzir o alimento e absorver os resíduos)? Quanta terra seria necessária para suportar uma economia com os padrões de vida existentes?

Fonte: Wackernagel e Rees (1996)

4.6.1. PEGADA ECOLÓGICA CONVENCIONAL

Wackernagel e Rees (1996) introduziram o conceito de Pegada Ecológica e seu método (Wackernagel e Rees, 1997). A idéia básica é de que cada indivíduo, processo, atividade e região têm um impacto na Terra, através de uso de recursos, geração de resíduos e uso de serviços fornecidos pela natureza. Esses impactos podem ser convertidos em áreas biologicamente produtivas. Assim, a pegada mostra a extensão que a humanidade se apropria da produtividade da natureza. Em outras palavras, a pegada ecológica é uma medida do impacto da população expressa em termos de área apropriada.

O conceito e o indicador da Pegada Ecológica parecem ser aceitos sem críticas por muitos cientistas e políticos, e especialmente por organizações ambientais (van den Bergh e Verbruggen, 1999). O método quantifica os fluxos de energia e massa de uma economia ou atividade específica, convertidos em áreas correspondentes necessárias para suportar esses fluxos. O poder do método está no fato de que toda a exploração humana dos recursos e do meio ambiente é reduzida a uma única dimensão, áreas de terra e água para seu suporte.

Hails et al. (2006) afirmam que a Pegada Ecológica não prevê o futuro, portanto ela não estima perdas futuras causadas pela atual degradação dos ecossistemas. Os mesmos autores acrescentam que as contas da pegada não indicam a intensidade com que cada zona biologicamente produtiva está sendo utilizada, nem apontam as pressões específicas à biodiversidade.

4.6.1.1. SUPOSIÇÕES

De acordo com Loh e Wackernagel (2004), a contabilidade da EF-GAEZ está baseada em seis considerações:

Suposição 1: É possível monitorar as quantidades anuais dos recursos consumidos e desperdícios gerados pela população.

As quantidades anuais dos recursos consumidos e desperdícios gerados pela população podem ser medidas em termos físicos (toneladas, joules ou metros cúbicos). Os dados se encontram disponíveis em estatísticas nacionais e mundiais. O consumo

pode ser calculado pelo balanço entre produção doméstica e comércio internacional (importações e exportações)

Suposição 2: A maioria dos fluxos (recursos e desperdícios) podem ser medidos em termos de área necessária para manter estes fluxos.

Esta suposição está baseada na relação existente entre processos bioprodutivos e superfícies que podem capturar a luz solar por fotossínteses. Atualmente a maioria dos ecossistemas pode ser mapeada considerando este princípio. Fluxos de recursos e desperdícios que não podem ser medidos nestes termos são excluídos da avaliação. Como consequência, o valor da pegada ecológica é subestimado como seus autores reconhecem (Loh e Wackernagel, 2004).

Suposição 3: As diferentes zonas em hectares reais podem se expressar em termos de áreas padronizadas com produtividade média.

Pela ponderação de cada área em proporção à sua produção potencial anual de produtos agrícolas, as diferentes zonas podem ser expressas em áreas padronizadas. Estas áreas padronizadas, chamadas “hectares globais” (gha), representam os hectares com potencial para produzir biomassa utilizável (cultivos) igual à média potencial mundial de um determinado ano.

Suposição 4: As áreas servem somente a um propósito.

Áreas que produzem recursos e assimilam desperdícios podem servir a um único propósito. Uma das críticas à metodologia convencional nasce desta suposição: “não considerar que alguns (ou todos os) ecossistemas podem fornecer outras funções ou serviços ecossistêmicos, além de produzir recursos” (Venetoulis e Talberth, 2007).

Suposição 5: As áreas equivalentes à demanda humana (pegada) e à oferta da natureza (biocapacidade) podem ser diretamente comparadas.

Assim, os componentes e as categorias são comensuráveis e facilmente comparáveis. Foi esta propriedade que converteu a Pegada Ecológica em uma ferramenta didática e simples de comparação do impacto humano e da oferta da natureza.

Suposição 6: A área de demanda pode exceder a área ofertada.

Uma pegada maior que a biocapacidade indica que a demanda excede a capacidade regenerativa do capital natural existente. Isto representa que o sistema, da forma como é administrado, é insustentável. Por exemplo, se produtos florestais são explorados a uma taxa que é o dobro da taxa de regeneração, sua pegada é duas vezes o tamanho da floresta. Isto significa que essa exploração ocorre de forma insustentável. Loh e Wackernagel (2004) se referem a esta situação como “excesso ecológico”. Já Hails et al. (2006) se referem a “déficit ecológico”. O caso contrário, em que há um saldo positivo, é chamado de “reserva ecológica”. Muitos países compensam seus déficits ecológicos através da importação de biocapacidade de outros países.

4.6.1.2. UNIDADE DE MEDIDA

A unidade de medida da pegada ecológica é o “hectare global” (gha). Esta unidade corresponde a um hectare de espaço biologicamente produtivo com “produtividade média mundial”. Este componente espacial faz da Pegada Ecológica, uma poderosa ferramenta pedagógica e comunicativa dos efeitos do consumo de recursos, aos usuários finais (Costanza, 2000), conseqüentemente, uma medida de fácil entendimento e interpretação da sustentabilidade de um ecossistema (Siche et al., 2007).

No hectare global, a produtividade não se refere a uma taxa de produção de biomassa, tal como a Produtividade Primária Líquida (NPP) que descreve a habilidade inerente de suportar a produção agrícola, e conseqüentemente populações humanas. A produtividade, nesse caso, é o potencial de alcançar a produção agrícola máxima a um nível específico de entradas.

A finalidade de se utilizar os hectares globais na EF em geral (sem importar a versão da metodologia) é permitir a comparação das duas partes que compõem o cálculo da EF, a Pegada e a Biocapacidade, dos diferentes países, os quais têm qualidades e características diferentes de áreas para cultivos, pastagem, florestas e zonas de pesca. O método utiliza dois fatores para converter cada uma das áreas biologicamente produtivas dos países, de hectares (ha) a hectares globais (gha): o fator de equivalência e o fator de rendimento.

4.6.1.3. FATORES DE EQUIVALÊNCIA

Fatores de equivalência (EQF) representam a produtividade potencial média global de um determinado espaço bioprodutivo em relação à produtividade média global de todas as áreas bioprodutivas. Segundo Monfreda et al. (2004), um espaço destinado ao cultivo é mais produtivo do que uma área de pastagem, e logo deve ter um fator de equivalência maior. Os fatores de equivalência para o ano de 2001 estão listados na tabela 2:

Tabela 2: Fatores de Equivalência (dados de 2001)

Área Bioprodutiva	Fatores de Equivalência (gha/ha)
Cultivo (total)	2,1
Primário	2,2
Marginal	1,8
Pastagem	0,5
Floresta	1,4
Pesca	0,4
Construída*	2,2

Fonte: Monfreda et al. (2004)

** Segundo Monfreda et al. (2004), considera-se que a área construída está localizada sobre terra agrícola primária (áreas mais férteis). Logo, as áreas construídas têm o mesmo fator de equivalência que as áreas de cultivo primário.*

Os fatores de equivalência para cultivo, floresta, pastagem e área construída são derivados do índice de conveniência (SI) das “Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) 2000”. GAEZ é um modelo espacial (IIASA e FAO, 2000) de potenciais de produtividade agrícola.

Como pode ser observado no esquema da figura 8, o modelo GAEZ mapeia o potencial de produção agrícola de diversas variedades de cultivo com dados de tipo de solo, declividade, estações do ano, precipitação, etc. O modelo assinala índices de conveniência ou medidas de produtividade potencial para cada tipo de área, que nada mais são do que a aptidão dessas terras em produzir cultivos. Essas estimativas são

feitas levando-se em conta o mesmo nível de inputs, como água e fertilizantes, independente das taxas de manejo e de produção de biomassa (IIASA e FAO, 2000).

Portanto, o fator de equivalência é a razão entre o SI específico do uso da terra pela média dos SI's. De forma geral, os fatores de equivalência definem a quantidade de hectares globais (gha) contidos em uma categoria de uso de terra ou espaço pesqueiro (ha). Funcionam como um elemento redistributivo dos hectares reais em seu equivalente de hectares globais; por exemplo, o valor de $EQF_{\text{cultivos}_{2001}} = 2,21$ significa que cada hectare real cultivado equivale a 2,21 hectares globais.

$$\text{Fator de Equivalência} = \frac{\text{Produtividade Potencial Média Global de um Tipo de Área}}{\text{Produtividade Potencial Média Global de Todas as Áreas}} \quad (\text{equação 10})$$

Nos cálculos da Pegada Ecológica o valor do fator de equivalência referente às áreas de pesca é estimado como sendo sua capacidade de fornecer proteína animal em relação às áreas de pastagem. Segundo Monfreda et al. (2004), o fator de equivalência da pesca é 80% do valor do fator da pastagem (tabela 1).

Um dos aspectos enfatizados por Monfreda et al. (2004), é que o potencial de produtividade difere das medidas de produtividade de um ecossistema como a Produtividade Primária Líquida (NPP). Segundo eles, cálculos baseados no potencial têm muitas vantagens. Focar na produtividade potencial permite contrastar quantidades de consumo e produção de forma mais precisa. Por exemplo, a quantidade de madeira extraída bem como a quantidade disponível para extração pode ser medidas de forma mais precisa do que a NPP removida ou comprometida no processo, o que exigiria incluir toda a biomassa envolvida (vegetação rasteira, casca da árvore, folhas, raízes, etc).

É importante destacar que o método convencional da Pegada Ecológica exclui porções de terra onde a produtividade supostamente é insignificante (tundra, desertos, geleiras e mar aberto). Também é importante ressaltar que os fatores de equivalência são os mesmos para todos os países, e variam anualmente.

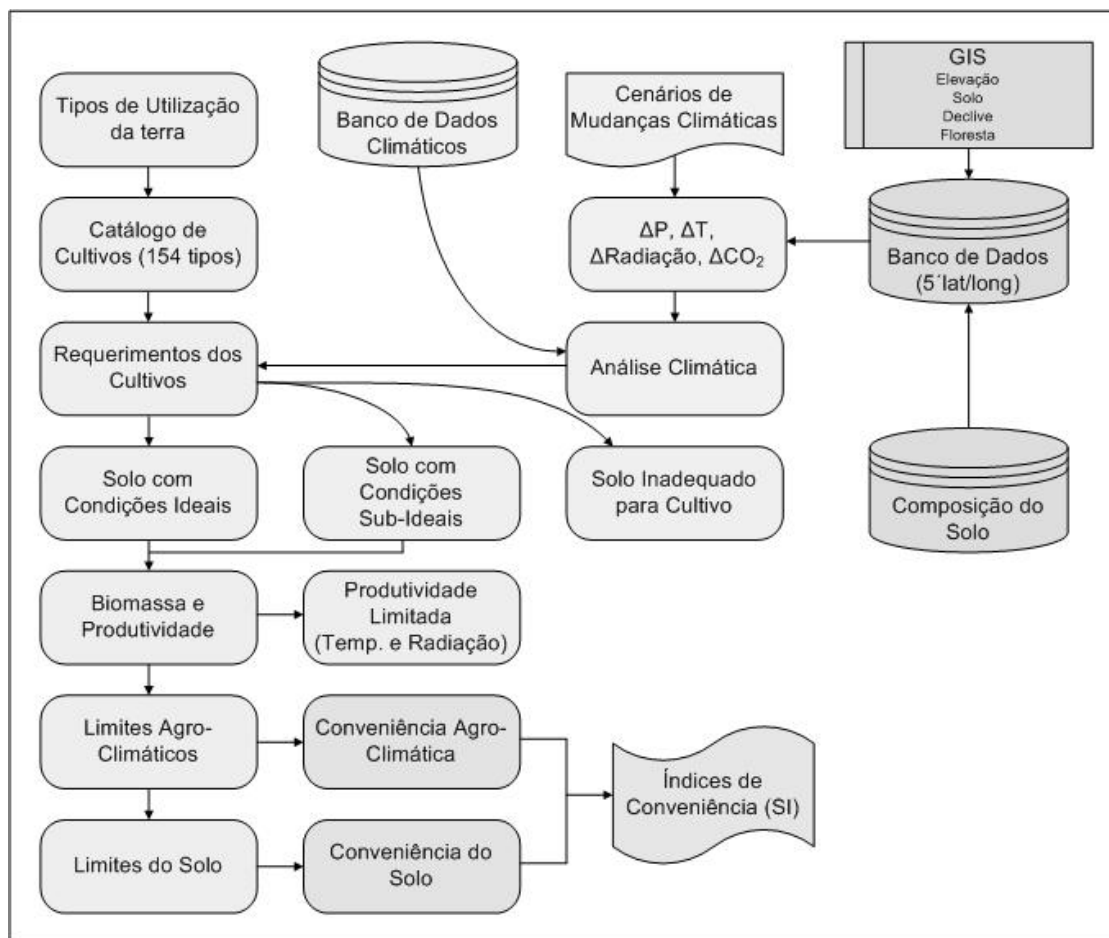


Figura 8: Esquema do modelo espacial GAEZ 2000 (IIASA e FAO, 2000)

4.6.1.4. FATORES DE RENDIMENTO

Fatores de rendimento descrevem o quanto uma área bioproductiva de um determinado país é mais (ou menos) produtiva do que a média global da mesma área (Monfreda et al., 2004).

Cada país tem seus fatores de rendimento, que são calculados anualmente, um para cada tipo de área. Eles representam a razão entre a área que um país utiliza para produzir seus bens e a área que seria necessária para produzir os mesmos bens com as médias de produtividade mundial. Por exemplo, o fator de rendimento para áreas de cultivo no Brasil, é a razão entre a produtividade média brasileira e a mundial. Segundo Monfreda et al. (2004), os fatores de rendimento refletem a tecnologia e as práticas de manejo prevalentes no país, bem como a produtividade inerente de recursos renováveis. Em outras palavras, a produção agrícola do país, depende tanto da fertilidade do solo como dos métodos de colheita.

Alguns valores de fatores de rendimento para países selecionados estão listados na tabela 3:

Tabela 3: Fatores de Rendimento (Dados de 2001)

País	Cultivo	Floresta	Pastagem	Pesca
Argélia	0,5	0,1	0,7	0,7
Guatemala	1,0	1,4	2,9	0,2
Hungria	1,5	2,9	1,9	1,0
Japão	1,6	1,6	2,2	1,4
Nova Zelândia	1,8	2,4	2,5	0,2
Zâmbia	0,5	0,3	1,5	1,0

Fonte: Loh e Wackernagel (2004)

Na tabela 2, o valor de fator de rendimento de 1,8 para terras de cultivo da Nova Zelândia significa que a produtividade média dos cultivos da Nova Zelândia é 1,8 vezes a produtividade média global dos cultivos do mundo. Já no caso de Argélia e Zâmbia, o fator de rendimento de 0,5 indica que a produtividade média dos cultivos desses países são a metade da produtividade média global dos cultivos do mundo.

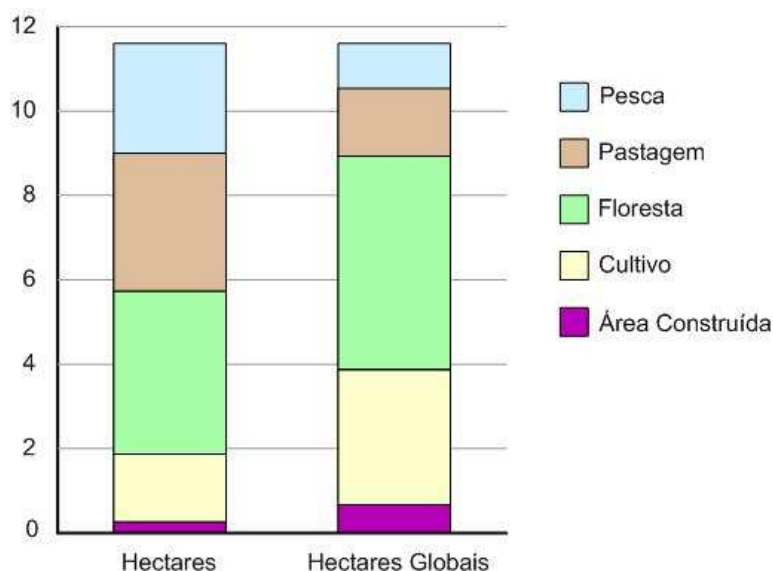


Figura 9: Áreas Bioprodutivas Globais: Hectares e Hectares Globais por Categoria

O número total de hectares e hectares globais bioprodutivos é idêntico para o mundo todo. Os hectares de cada tipo de área são convertidos em hectares globais utilizando-se fatores de equivalência (diferença de produtividade entre as categorias) e fatores de rendimento (diferença entre produtividade local e global de uma mesma categoria).

4.6.1.5. TÉCNICAS DE CÁLCULO DA PEGADA ECOLÓGICA CONVENCIONAL

As primeiras Pegadas Ecológicas foram calculadas utilizando a abordagem por componentes. Com a evolução do método com o objetivo de se tornar mais compreensivo e robusto, surgiu o método composto, que agora é usado para o cálculo nacional (Simmons et al., 2000).

O método por componentes foi desenvolvido pela Best Foot Forward (BFF) e é descrita com detalhes por Chambers et al. (2000). Este enfoque soma a pegada ecológica de todos os componentes relevantes do consumo de recursos de uma população, processo ou atividade, e sua produção de resíduos. Isto é feito em dois passos: primeiro, identificando e contabilizando todos os itens individuais que uma dada população, processo ou atividade consome; segundo, avaliando a pegada ecológica de cada componente usando dados do ciclo de vida. Segundo Monfreda et al. (2004), a exatidão global do resultado final depende da integralidade da lista de componentes, assim como da confiabilidade da avaliação do ciclo de vida (LCA) de cada componente identificado. Eles acrescentam que este enfoque pode produzir resultados incorretos, dadas as limitações do LCA: falta de exatidão e informações sobre o ciclo de vida dos produtos, problemas de dupla contagem no caso de cadeias complexas de produção e ampla quantidade de detalhes para cada processo analisado (Lenzen, 2001). O enfoque por componentes é indicado para análises locais, regionais e de organizações (George e Dias, 2005).

Segundo Simmons et al. (2000), os componentes relevantes para o cálculo da Pegada Ecológica por componentes são os seguintes:

- Eletricidade (Doméstica)
- Gás (Doméstico)
- Eletricidade (Outra)
- Viagens de carro, ônibus, trem e avião
- Gastos com estradas
- Frete ferroviário, marítimo, aéreo
- Alimentos (agrícolas, pecuários, pesqueiros, etc)
- Produtos madeireiros

- Resíduos reciclados: vidro, papel, cartão, metais, compostagem
- Resíduos: domésticos, comerciais, inertes
- Água
- Área Urbanizada

A Pegada Ecológica composta foi desenvolvida e descrita com detalhe por Wackernagel e Rees (1996). Este enfoque calcula a pegada ecológica usando dados nacionais agregados (produção e produtividade) e dados do comércio internacional (importações e exportações). Tais dados agregados capturam a demanda de recursos sem a necessidade de informação sobre o uso final de cada um deles. Por exemplo, para calcular a Pegada de um país associada a produtos de papel, informações sobre a quantidade total consumida estão disponíveis e são suficientes para a tarefa. Em contraste com o método por componentes, não há necessidade de se saber quanto do consumo de papel foi usado para cada propósito, como uso no escritório, comercial, impressão, etc. Conseqüentemente, este enfoque é vantajoso para ser aplicado em análises de países, permitindo uma comparação entre eles (Monfreda et al., 2004).

4.6.1.6. OS COMPONENTES DA PEGADA ECOLÓGICA

O cálculo da Pegada Ecológica é dividido em duas partes: a oferta ecológica (biocapacidade) e o consumo da população (pegada).



Figura 10: A Pegada Ecológica é uma medida da pressão imposta por uma determinada população sobre a natureza

Fonte: Wackernagel e Rees (1996)

4.6.1.6.1. O CONSUMO (PEGADA)

Globalmente, a produção de cultivos, pastagem, floresta, pesca e áreas construídas, equivalem ao consumo (Figura 11). Essas categorias representam áreas em hectares que somadas resultam na pegada ecológica total.

CONSUMO, PRODUÇÃO E COMÉRCIO

Os cálculos nacionais distinguem produtos produzidos dentro de um país de produtos consumidos pelo país. A produção inclui todos os bens domésticos produzidos, sem levar em consideração seu uso final. A pegada, no entanto, leva em conta o consumo, que é calculado somando as importações e subtraindo as exportações da produção doméstica:

$$\text{Consumo} = \text{Produção Doméstica} + \text{Importação} - \text{Exportação} \quad (\text{equação 11})$$

Se o país A exporta 1 tonelada de carne de carneiro para o país B, as pegadas de alimentação, pastagem e energia necessárias para gerar essa tonelada de carne são deduzidas do país A e acrescentadas ao país B para determinar seu consumo. Segundo Monfreda et al. (2004), apesar desses ajustes, algumas atividades de consumo, como o turismo, são atribuídas ao país onde ocorrem, ao invés do país de origem dos viajantes.

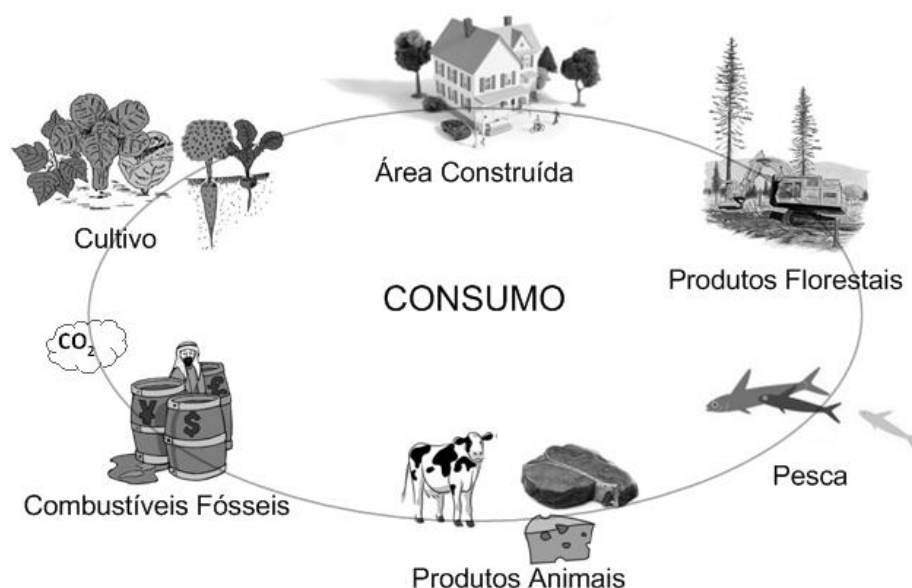


Figura 11: Categorias da Pegada

Recursos Renováveis

Cultivos, pastagens, florestas e zonas de pesca abrangem ecossistemas globais que fornecem à economia humana um grande volume de seus recursos renováveis. A pegada para cada uma destas áreas é a soma das pegadas de todos os produtos consumidos dentro de cada categoria. Um enfoque mais realista é calcular estas pegadas considerando dentro de cada categoria produtos primários e produtos secundários (Tabela 3).

a. Produtos Primários

Representam os produtos não processados, que podem ser usados diretamente (ou minimamente processados) ou ser transformados em produtos secundários. No caso de cultivos, pasto e floresta, estes incluem produtos imediatos da fotossíntese, tais como frutas e vegetais crus, forragem para animais domésticos e madeira em tora. Para pesca, os produtos primários são peixes não processados da pesca marinha e continental. A pegada destes produtos representa a capacidade biológica e técnica requerida para sua produção. Segundo Wackernagel et al. (2005) a pegada destes produtos representa a capacidade biológica e técnica requerida para sua produção.

b. Produtos Secundários

Estes produtos são bens derivados dos produtos primários, incluindo carne, leite, papel e peixes cultivados. Quando a pegada de um produto (primário ou secundário) é calculada com o rendimento global, a pegada do produto secundário se iguala à pegada do produto primário. Ou seja, a porção da pegada de um produto primário que é usada para gerar um produto secundário (por exemplo, cereais para farinha ou madeira em tora para papel) é transferida ao produto secundário (Monfreda et al., 2004).

Tabela 4: Exemplos de Produtos Primários e Secundários

Componente	Primário	Secundário
Cultivos	Milho	Óleo de germe de milho
	Trigo	Farinha de germe de trigo
Pastos	Forragem	Carne e leite
Floresta	Madeira em tora	Madeira serrada
	Lenha	Nenhum
Pesca	Bacalhau	Óleo de fígado de bacalhau
	Sardinha	Óleo de sardinha
	Peixes pelágicos	Salmões da aquicultura

Fonte: Monfreda et al. (2004)

É importante ressaltar que a pegada inclui somente a demanda de área desses produtos primários e secundários. Não contabiliza outros efeitos potenciais sobre futura perda de produtividade, por exemplo. Teoricamente, estimativas da pegada deveriam incluir também a demanda de área dos efeitos colaterais da agricultura intensiva (como a poluição da água, perda de solo, etc.), mas os cálculos ainda não consideram esses aspectos por falta de dados. Esta é uma das razões pela qual seus criadores (Wackernagel et al., 2005) dizem que a estimativa da demanda sobre a natureza provavelmente esteja subestimada.

Áreas de Cultivo

A pegada de áreas de cultivo mede a área ocupada destas áreas por exclusão de outros usos de terra. Além, a Pegada captura a energia incorporada nas entradas da agricultura (fertilizantes, pesticidas, mecanização) (Monfreda et al. (2004), porém não considera a degradação devido a práticas agrícolas. Segundo Hails et al. (2006), a pegada de cultivos aumentou de 1,8 bilhões de gha (ou 0,70 gha/pessoa) em 1960 para 3,08 bilhões de gha (ou 0,49 gha/pessoa) em 2003.

Áreas Construídas

A Pegada Ecológica supõe que infra-estrutura e estabelecimentos humanos ocupam regiões agrícolas férteis. Parte da área dos estabelecimentos é pavimentada e outras áreas ainda são bioprodutivas, como jardins ou parques. A pegada inclui as áreas cuja produtividade agrícola foi anulada, já que a maior parte de estabelecimentos

humanos está localizada sobre as áreas mais férteis do país. Áreas ocupadas por hidroelétricas também são incluídas. Por considerar que as áreas urbanizadas estão localizadas sobre terras aráveis, essas áreas recebem os mesmos fatores de equivalência e rendimento que as de cultivo. Estima-se que a pegada ecológica deste espaço ecológico aumentou de 0,13 em 1961 para 0,49 bilhões de hectares globais em 2003, um aumento de cerca de 270% em um período de 43 anos (Monfreda et al., 2004)

Áreas de Pastagem

A pegada estima os requerimentos energéticos do gado através do consumo de alimentos concentrados, forragem cultivado e resíduos dos cultivos. Os requerimentos de energia restantes são atribuídos aos pastos (Monfreda et al., 2004). Loh e Wackernagel (2004) assumem que 100% do pasto é utilizado, a menos que o pasto produza mais de duas vezes o requerimento alimentício necessário para o gado. Neste caso, a pegada de pastagem é contabilizada como sendo duas vezes o requerimento de área mínima para manter o gado. Assim, a pegada de áreas de pastagem está limitada, ou seja, no máximo será o dobro da menor pegada possível por unidade de produto animal. Estes aspectos estão embutidos no fator de rendimento de pastos. Segundo os últimos relatórios (Loh e Wackernagel, 2004; Hails et al., 2006) a pegada de zonas de pasto no mundo passou de 0,41 bilhões de gha em 1960 a 0,91 bilhões gha em 2003, ou seja, uma pegada total aproximadamente 123% maior (figura 12).

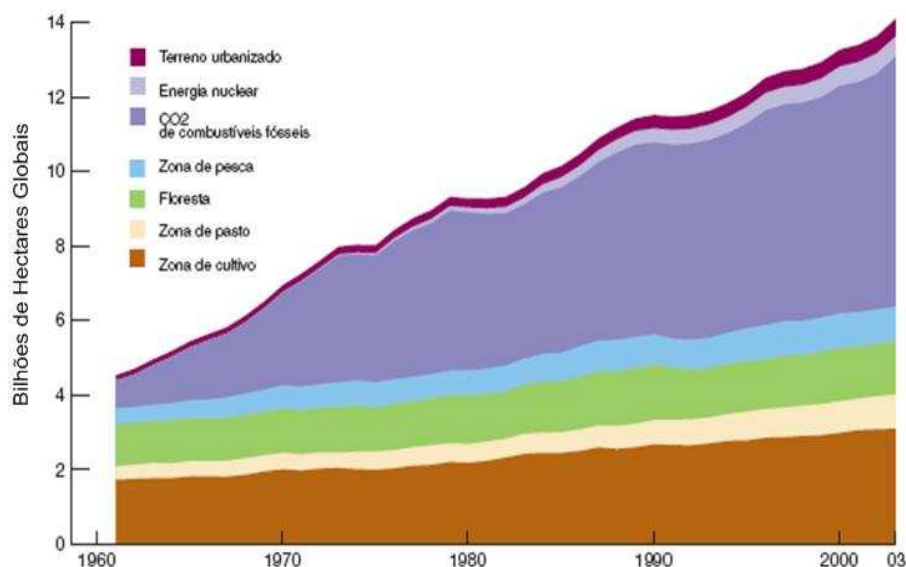


Figura 12: Pegada Global por Categorias de Consumo: 1960 - 2003

Fonte: Hails et al. (2006)

Áreas de Floresta

A madeira cortada e a lenha constituem os produtos primários da pegada das áreas de floresta. A madeira cortada é dividida em quatro produtos: madeira serrada, painéis a base de madeira, papel e polpa de madeira.

A pegada de áreas de floresta (incluindo madeira e lenha) aumentou de 1,03 para 1,45 bilhões de gha, quase 50% desde 1960 a 2001 (Loh e Wackernagel, 2004). Já em 2003 a pegada de florestas foi estimada em 1,43 bilhões de gha (Hails et al., 2006) (tabela 4). Portanto observa-se uma leve diminuição da pegada de florestas nos últimos anos (figura 12).

Áreas de Pesca

Os cálculos da pegada de zonas de pesca incluem oito categorias de peixes e animais aquáticos e uma categoria de plantas aquáticas. Estas nove categorias contêm 42 grupos de espécies e cada grupo possui uma média de captura, taxa de descarte e nível trófico (TL). Estes dados são usados para calcular a demanda na natureza representada pela captura de uma unidade de cada espécie (Monfreda et al., 2004). Peixes de níveis tróficos mais elevados consomem uma porção maior da produtividade primária dos oceanos do que peixes de níveis tróficos mais baixos – aproximadamente 10 vezes por nível trófico (Pauly e Christensen, 1995). Assim, uma tonelada de bacalhau no nível trófico 4 tem uma pegada 10 vezes maior do que uma tonelada de sardinhas no nível trófico 3. Os cálculos atuais (Monfreda et al., 2004) já incluem estimativas da pegada da pesca em função da quantidade de captura e do nível trófico:

$$\text{Rendimento (kg/ha)} = \text{Max PPR (kg/ha)} \times \text{ET}^{(1-\text{TL})} \times \text{fator de rendimento} / \text{taxa de descarte}$$

(equação 12)

O máximo requerimento de produção primária (Max PPR) equivale à máxima produção primária líquida (NPP) que pode ser aproveitada. A eficiência de transferência (ET) representa a biomassa transferida entre níveis tróficos. Pode-se considerar como valor de referência uma ET = 10% (Pauly e Christensen, 1995).

A pegada de áreas de mar em 2003 foi de 0,94 bilhões de gha (Hails et al., 2006), que comparado com 0,31 bilhões de gha em 1960 (Loh e Wackernagel, 2004), representa um aumento de três vezes na pegada ao longo de 43 anos.

Pegada de Combustíveis Fósseis e Energia Nuclear

Supondo que a oferta de combustível fóssil é muito menos limitada do que a habilidade da biosfera em lidar com o desperdício, a biosfera necessitaria de uma capacidade adicional para acomodar esses resíduos. O cálculo da pegada define este último enfoque como a área requerida para assimilação de resíduos.

Monfreda et al. (2004) afirma que o enfoque de assimilação de resíduos não sugere que o seqüestro de CO₂ é a solução às mudanças climáticas, mas ilustra o quanto o mundo necessitaria se esforçar para lidar com as emissões antropogênicas de CO₂. House et al. (2002) acrescentam que o potencial para o seqüestro é limitado pelo espaço (uma quantidade de área disponível para a reflorestamento) e pelo tempo (florestas plantadas são dissipadores líquidos por poucas décadas antes que amadureçam e percam sua capacidade de absorção).

A pegada do uso de combustíveis fósseis é o componente que mais cresceu nos últimos 40 anos (gráfico 4) de aproximadamente 0,51 bilhões de gha em 1961 para 6,73 bilhões de gha em 2003, o que significa um aumento de mais de 1200%.

Outro enfoque proposto pelo método examina a capacidade necessária para substituir a energia consumida através da substituição por biomassa. Sobre esse enfoque, Monfreda et al. (2004) afirma que a lenha representa o combustível primário fornecido pela biosfera sem modificação humana, historicamente dominante na maioria de sociedades, além de ser um combustível de auto-reposição. Biocombustíveis alternativos com exigências de espaço mais baixas (tais como o etanol) são possíveis, mas não ocorrem sem intervenção humana e processos industriais.

Em termos de uso direto de energia, a pegada pode ser expressa como sendo:

$A \times B \times C$, onde A = população; B = uso médio de energia (GWh) por região ou setor produtivo; e C = o impacto de produzir um GWh de energia.

Assim, a pegada do uso direto da energia se assemelha à definição de Ehrlich e Holdren (1971) do impacto humano (I) no ambiente ($I=PAT$, onde P = população; A = afluência; e T = tecnologia). Nesta formulação o impacto (I) corresponde à pegada do uso de recursos (energia) de uma população, processo, etc. (convertidos em área de terra); o consumo é uma função da afluência (A) e do estado da tecnologia atual (T).

A produção atual de energia nuclear em muitos países justifica a necessidade de avaliar o papel do consumo deste recurso no capital natural. Segundo a World Nuclear Association (WNA, 2007) atualmente existem 435 reatores nucleares operando em 30 países, com aproximadamente 370 000 MWe (megawatts elétricos) de capacidade total, os quais fornecem 16% da eletricidade do mundo. Deste 16%, seis países geram mais de 40% de suas produções totais de energia elétrica com centrais nucleares: Lituânia (78%), França (78%), Eslováquia (57%), Bélgica (55%), Suécia (50%) e Ucrânia (48%).

Por outro lado, o consumo de energia nuclear é diferente de outras categorias da pegada, pois produz resíduos sobre os quais a biosfera tem uma capacidade assimilativa quase nula (Wackernagel et al., 2005). Segundo os autores do método, a energia nuclear não deve ser incluída nas contas da pegada para mantê-la consistente com seus princípios e suposições, já que os resíduos produzidos não podem ser assimilados pelas áreas consideradas nos cálculos. Naturalmente isso não implica que a energia nuclear não apresente impactos ambientais.

O método assume, então, que a pegada da energia nuclear é a pegada equivalente da eletricidade produzida pelos combustíveis fósseis (Hails et al., 2006). Segundo Ferguson (2002), cada gigajoule de energia nuclear produzida equivale à 0,02 tC emitido. Atualmente, a pegada de energia nuclear representa aproximadamente 4% (0,5 bilhões de gha) da pegada global total (14,1 bilhões de gha) (tabela 5).

Tabela 5: Pegada Global por Categorias: 2001 e 2003

Zonas Produtivas	Pegada em 2001 (bilhões de gha) *	Pegada em 2003 (bilhões de gha) **
Cultivos	3,0126	3,0786
Pastagem	0,8607	0,9141
Floresta		
Madeira	1,1067	1,0874
Lenha	0,3443	0,3502
Pesca	0,7993	0,9357
Energia (CO ₂)	6,3325	6,7265
Energia Nuclear	0,5533	0,5041
Área Construída	0,4304	0,4854
Total	13,4398	14,0820

* Relatório de Loh e Wackernagel (2004) usando uma população global de 6148,1 milhões de pessoas para o ano 2001.

** Relatório de Hails et al. (2006) usando uma população global de 6301,5 milhões de pessoas para o ano 2003.

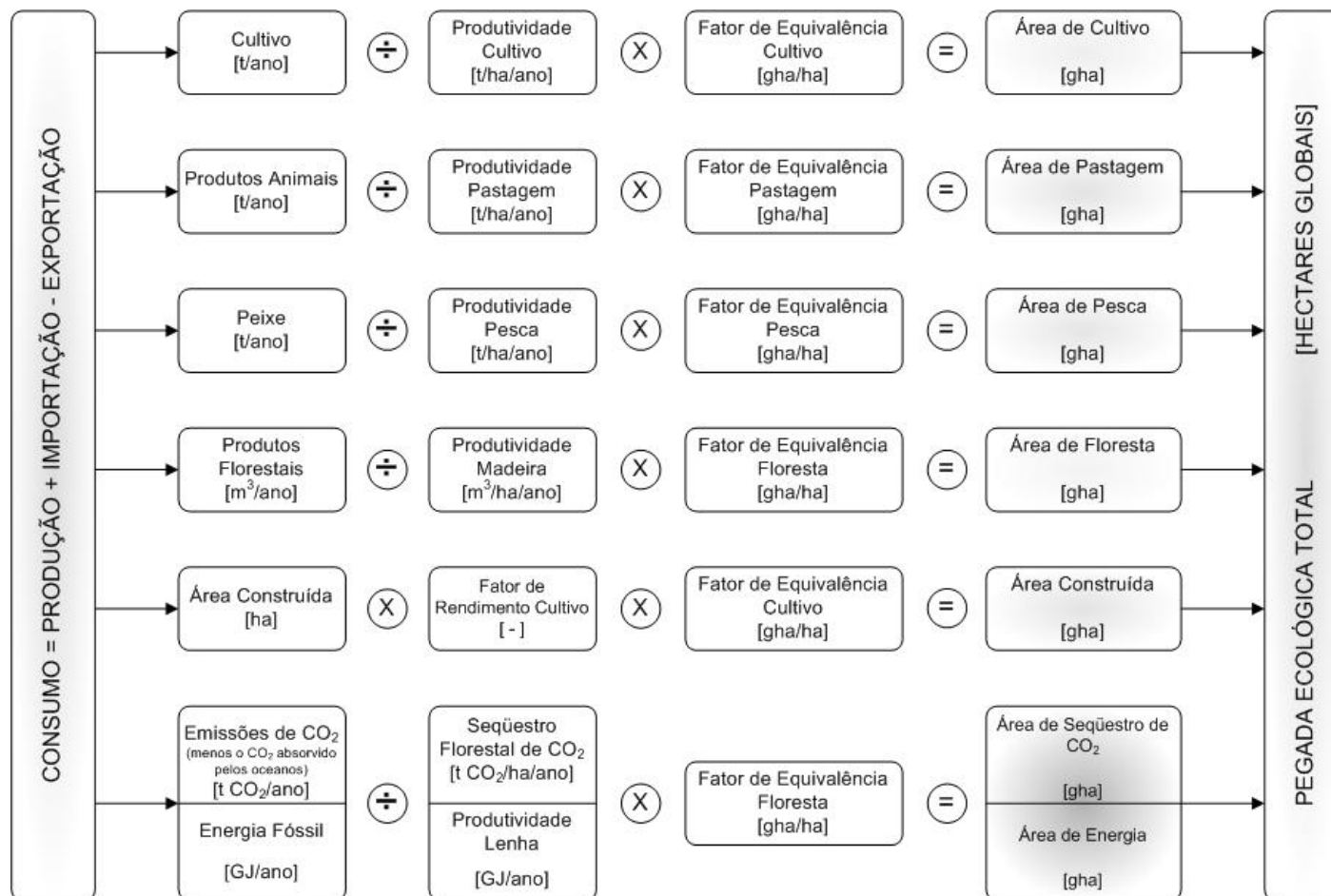


Figura 13: Estrutura de Cálculo da Pegada. Para simplificar esse esquema, excluem-se produtos secundários e energia nuclear. As estimativas de energia fóssil podem ser utilizadas em alternativa às emissões de CO₂.

Fonte: Monfreda et al. (2004)

4.6.1.6.2. A OFERTA DA NATUREZA (BIOCAPACIDADE)

A capacidade de carga é definida convencionalmente como o tamanho máximo da população de certa espécie que uma determinada área pode suportar sem que sua produtividade seja irremediavelmente comprometida (Catton, 1993). Na pegada ecológica a capacidade de carga se traduz na capacidade biológica ou biocapacidade medida em hectares globais. A biocapacidade é a capacidade de produção biológica (expressa em hectares globais) de um espaço com atividade fotossintética e acumulação de biomassa aproveitável.

A Pegada Ecológica utiliza no cálculo da biocapacidade categorias de espaço ecológico ou áreas de terra e mar bioprodutivos, subdivididas em: cultivo, pastagem, floresta, mar e área construída (figura 14). Segundo Monfreda et al. (2004) estas áreas capturam a bioprodutividade do planeta ao qual um país ou região tem direito, e representam a taxa teórica máxima da oferta de recursos. As áreas marginais com vegetação pouco uniforme e áreas não-produtivas não são incluídas (Loh e Wackernagel, 2004) no cálculo. Segundo Monfreda et al. (2004) em 2001 havia 11,4 bilhões de hectares de áreas bioprodutivas no planeta. Dividindo-se esse número pela população de 6,15 bilhões de pessoas no ano em questão, tem-se uma biocapacidade por pessoa de 1,8 hectares (Loh e Wackernagel, 2004). No ano de 2003 essa biocapacidade diminuiu para 11,27 bilhões de hectares ou 1,79 ha/pessoa (Hails et al., 2006). Isto significa uma diminuição da biocapacidade de aproximadamente 68 milhões de hectares por ano no mundo.

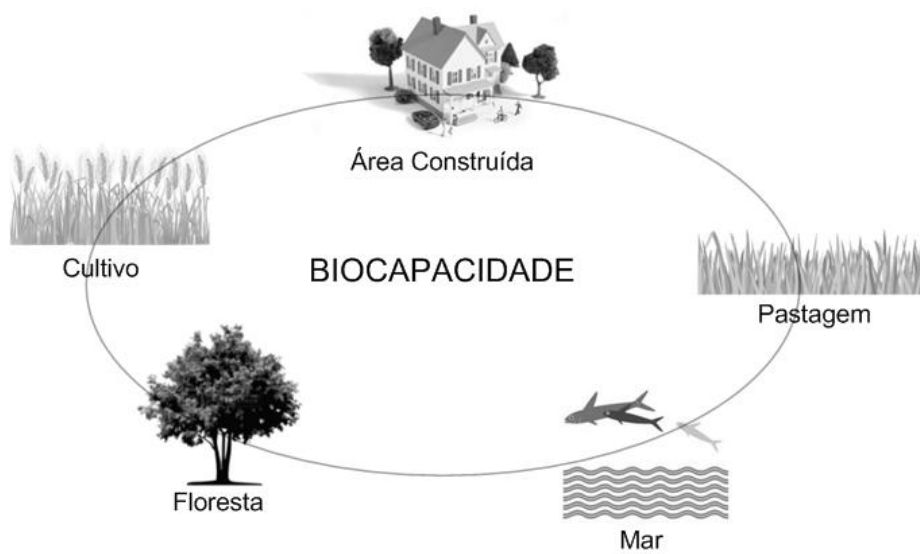


Figura 14: Categorias da Biocapacidade

Áreas de Cultivo

São as terras aráveis para o cultivo de alimentos para humanos e animais. Segundo Monfreda et al. (2004), estas áreas são consideradas as mais produtivas do mundo, por serem as maiores produtoras de biomassa vegetal. Nestas áreas não estão incluídas as terras aráveis usadas para pastagem. No ano de 2003, a área bioprodutiva de cultivos no mundo foi estimada em 1,51 bilhões de hectares. Segundo Monfreda et al. (2004) a medida da produtividade dessas áreas está baseada na produção de 70 cultivos e 15 produtos secundários.

Áreas de Pastagem

Consideram-se áreas de pastagem as que se destinam à criação de gado para produção de carne, couro, lã e leite. Segundo Monfreda et al. (2004), essas áreas são menos produtivas que as áreas de cultivo e sua conversão de área vegetal para animal reduz ainda mais a energia bioquímica disponível para uso humano. Sua expansão tem sido relacionada com a diminuição de áreas de florestas. No ano de 2003, cerca de 3,47 bilhões de hectares (ou 1,68 bilhões de gha) foram classificados como sendo de pastagem permanente. Valor que dividido pela população global no ano de 2003, resulta em aproximadamente 0,55 hectares por pessoa (ou 0,27 gha por pessoa). Áreas de pastagem permanente são definidas, geralmente, como aquelas áreas de terra usadas por 5 anos ou mais para forragem herbácea (cultivada ou selvagem) destinada à alimentação do gado (Monfreda et al., 2004).

Área de Pesca

São áreas destinadas à pesca. Segundo Wackernagel e Rees (1996), somente 8% do espaço total dos oceanos (36,3 bilhões de hectares) concentram-se ao longo das costas dos continentes no mundo e fornecem cerca de 95% da pesca comercial. Dessa forma tem-se um espaço produtivo marítimo de 2 bilhões de hectares e adicionando 0,3 bilhões de hectares de águas continentais, a área total produtiva é de 2,3 bilhões de hectares. Cálculos atuais estimam a área de pesca em 2,46 bilhões de ha (ou 0,86 bilhões de gha). No ano de 2002, a captura de peixes foi de 93,2 milhões de toneladas (FAO, 2004).

Áreas de Floresta

Dados da FAO (2005) revelam que há 3,95 bilhões de hectares de floresta no mundo. Este tipo de área pode ser definido segundo dois critérios: (a) áreas para produção de energia e (b) áreas para seqüestro de CO₂.

(a) *As áreas para produção de energia* são destinadas a florestas naturais ou plantadas para a produção de fibras, madeira e lenha. Estas áreas cumprem também outras funções como assegurar a estabilidade do clima, prevenir as erosões, manter os ciclos hidrológicos e proteger a biodiversidade.

(b) *Áreas para absorção de carbono:* são áreas fictícias calculadas pela pegada estimando-se a área de floresta necessária para seqüestrar as emissões de carbono do país. Segundo o IPCC (2001), 3,0 Gt C são absorvidos por ano pelo planeta, sendo que apenas um terço desse valor é absorvido pelas áreas terrestres. O restante, cerca de 2,1 Gt C, é absorvido pelos oceanos. A metodologia convencional da Pegada Ecológica estima a capacidade de seqüestro de carbono pelas florestas baseada em uma média de 26 biomas florestais entre os anos de 1980 a 1990. Segundo Monfreda et al. (2004), para cada tonelada de carbono emitida é necessário 1,05 hectare de floresta para sua absorção.

Áreas Construídas

São áreas destinadas à habitação, transporte, produção industrial e hidroelétricas. Dados da Eurostat (2000) sugerem que há um total de 0,3 bilhões de ha de terra construída e pavimentada no mundo. Na metodologia convencional, supõe-se que essas áreas construídas estão localizadas sobre as áreas mais férteis do planeta e que, portanto, estariam substituindo terras aráveis.



Figura 15: Estrutura de Cálculo da Biocapacidade. As estimativas de energia da biomassa podem ser utilizadas em alternativa às áreas de seqüestro de CO₂.

Fonte: Monfreda et al. (2004).

4.6.1.7. SALDO ECOLÓGICO

A Pegada Ecológica se baseia na consideração de que as áreas equivalentes à demanda humana (pegada) e à oferta da natureza (biocapacidade) podem ser diretamente comparadas. O saldo ecológico é uma dessas comparações e é obtida pela diferença entre a biocapacidade e a pegada.

$$\text{Saldo Ecológico} = \text{Biocapacidade} - \text{Pegada} \quad (\text{equação 13})$$

Um saldo positivo é um excesso ou reserva ecológica, e o saldo negativo é um déficit ecológico. Segundo Monfreda et al. (2004), essa medida pode servir como um indicador da sustentabilidade do país:

- *Reserva Ecológica:* se a pegada é menor do que a biocapacidade, o país possui uma reserva ecológica e pode ser considerado sustentável. Atualmente, muitos casos em que um país tem uma reserva ecológica, ela é exportada para outros países que estão em uma situação de déficit.



Figura 16: Reserva Ecológica: Biocapacidade > Pegada

Fonte: Wackernagel e Rees. (1996)

- *Déficit Ecológico:* ocorre quando a pegada de uma população (um país ou uma região) excede a capacidade biológica do espaço disponível para essa população. O déficit ecológico nacional mede a quantidade da pegada do país que excede a biocapacidade.



Figura 17: Déficit Ecológico: Pegada > Biocapacidade
Fonte: Wackernagel e Rees. (1996)

4.6.1.8. NÚMEROS DA PEGADA ECOLÓGICA

Atualmente, a biosfera tem aproximadamente 11,2 bilhões de hectares de espaço biologicamente produtivo correspondente à cerca de um quarto da superfície terrestre. Esses espaços biologicamente produtivos incluem 2,3 bilhões de hectares de oceano, rios e lagos e 8,8 bilhões de hectares terrestres. O espaço terrestre é composto por 1,5 bilhões de hectares de plantações, 3,5 bilhões de hectares de pastagem, 3,6 bilhões de hectares de florestas e 0,2 bilhões de hectares de terras construídas (EEA, 2000; SEI, 1998; WRI, 2000). Essas superfícies representam o espaço total biologicamente produtivo que fornece os meios para a sobrevivência das espécies animais. Dividindo os 11,2 bilhões de hectares disponíveis pela população global, chega-se ao resultado de 1,8 hectares biologicamente produtivos por pessoa no planeta.

Os Relatórios Living Planet da World Wildlife Fund indicam que o uso atual é de 13,5 bilhões de hectares ou 2,2 hectares por pessoa em média – mais de 20% acima do limite (Monfreda et al., 2004). O resultado acima indica que o consumo anual está reduzindo o estoque de capital natural, bem como diminuindo sua taxa de acumulação, ou seja, esse excesso é ecologicamente insustentável. A avaliação da Pegada Ecológica indica que as atividades humanas têm excedido a oferta da natureza por aproximadamente três décadas, e esse excesso vem se tornando maior ao longo do tempo (figura 18).

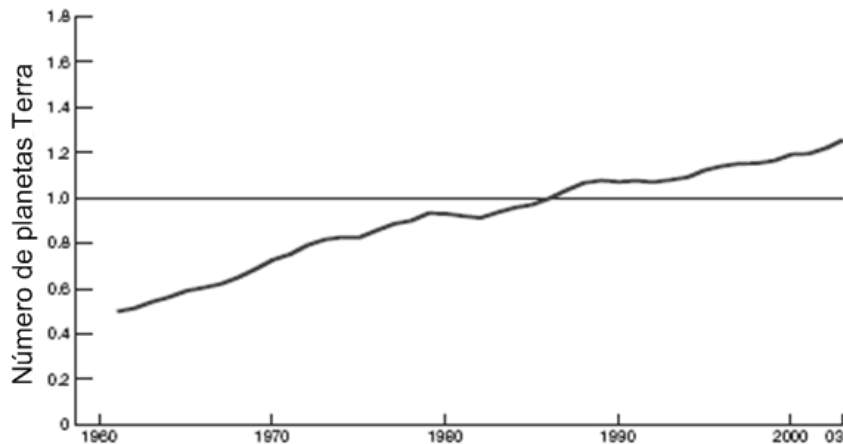


Figura 18: Evolução da Pegada Ecológica da Humanidade (1961-2003)

Fonte: Living Planet Report 2006 – World Wildlife Fund (Hails et al., 2006)

As medidas da Pegada Ecológica também podem ser apresentadas em termos do tipo de produtos ou serviços fornecidos, por exemplo, em termos de bens provenientes das plantações, produtos animais, peixes, produtos florestais, áreas construídas e uso de energia. Tal análise identifica quais áreas estão impondo maior estresse aos ecossistemas e pode auxiliar a estabelecer políticas prioritárias. O crescimento do uso de energia, especialmente combustíveis fósseis, é a área que mais contribui para o aumento da pegada. A Pegada Ecológica mede o total de hectares globais necessários para sustentar uma população, sem considerar que esses hectares estejam dentro ou fora dos limites territoriais dessa população. Isso é feito considerando o consumo líquido, ou seja, subtraindo os hectares utilizados para exportação daqueles usados para importação e produção interna. De forma simplificada, a análise se resume à comparação de dois conceitos embutidos no método: a pegada ecológica em si, que representa o consumo ou pressão ecológica exercida pela população, e a biocapacidade, que representa a oferta da natureza ou capacidade biológica dos sistemas naturais do planeta.

Os resultados obtidos para as nações variam consideravelmente, de valores próximos a 10 hectares por pessoa para países como Emirados Árabes Unidos, Estados Unidos da América e Kuwait, até valores menores do que 1 hectare por pessoa para países como Haiti, Somália e Afeganistão (Hails et al., 2006). Através da comparação da pegada com a capacidade bioprodutiva das nações é possível determinar se um país está em déficit ecológico (consumindo mais do que é ofertado pela natureza) ou tem um saldo

ecológico. Alguns países podem diminuir seus déficits ecológicos através da apropriação de áreas biologicamente produtivas de outros países. No entanto, o déficit global representado por 20% de excesso não pode ser compensando, pois existe apenas um planeta disponível.

Tabela 6: Pegada Ecológica, Biocapacidade e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) de Países (Dados de 2003)

<i>País/Região</i>	<i>População (milhões)</i>	<i>Biocapacidade (gha/pessoa)</i>	<i>Pegada Ecológica (gha/pessoa)</i>	<i>Reserva Ecológica/Déficit (gha/pessoa)</i>	<i>IDH</i>
Mundo	6 301,5	1,78	2,23	-0,45	0,74
África	846,8	1,3	1,1	+0,2	-
Etiópia	70,7	0,5	0,8	-0,3	0,37
África do Sul	45,0	2,0	2,3	-0,3	0,66
Oriente Médio - Ásia Central	346,8	1,0	2,2	-1,2	-
Afeganistão	23,9	0,3	0,1	+0,2	-
Emirados Árabes Unidos	3,0	0,8	11,9	-11,1	0,85
Ásia - Pacífico	3 489,4	0,7	1,3	-0,6	-
Austrália	19,7	12,4	6,6	+5,8	0,96
China	1 311,7	0,8	1,6	-0,8	0,76
Índia	1 065,5	0,4	0,8	-0,4	0,60
América Latina - Caribe	535,2	5,4	2,0	+3,4	-
Brasil	178,5	9,9	2,1	+7,8	0,79
Cuba	11,3	0,9	1,5	-0,6	0,82
México	103,5	1,7	2,6	-0,9	0,81
América do Norte	325,6	5,7	9,4	-3,7	-
EUA	294,0	4,7	9,6	-4,9	0,94
Canadá	31,5	14,5	7,6	+6,9	0,95
Europa UE	454,4	2,2	4,8	-2,6	0,92
Alemanha	82,5	1,7	4,5	-2,8	0,93
Itália	57,4	1,0	4,2	-3,2	0,93
Reino Unido	59,5	1,6	5,6	-4,0	0,94
Europa Não-UE	272,2	4,6	3,8	+0,8	0,79
Noruega	4,5	6,8	5,8	+1,0	0,96
Rússia	143,2	6,9	4,4	+2,5	0,80
Suíça	7,2	1,5	5,1	-3,6	0,95

Fonte: Living Planet Report 2006 – World Wildlife Fund

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é uma medida comparativa de riqueza, alfabetização, educação, esperança de vida, natalidade e outros fatores para os diversos países do mundo. É uma maneira padronizada de avaliação e medida do bem-estar de uma população, especialmente bem-estar infantil. O índice foi desenvolvido em

1990 pelo economista paquistanês Mahbub ul Haq, e vem sendo usado desde 1993 pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento em seu relatório anual.

O desenvolvimento sustentável consiste num compromisso para a melhoria do bem-estar humano, com a limitação de que este desenvolvimento se concretize dentro dos limites tecnológicos da biosfera. O progresso com vista ao desenvolvimento sustentável pode ser avaliado através do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) como um indicador do bem-estar, e da Pegada Ecológica como uma medida da exigência humana na biosfera. Segundo Hails et al. (2006) uma pegada menor que 1,8 hectare seria ideal, afinal é o tamanho do espaço biologicamente produtivo reservado para cada pessoa, se levarmos em conta a população atual do planeta, sem reserva para as outras espécies. O PNUD considera um valor de IDH acima de 0,8 para a classificação de “alto desenvolvimento humano”.

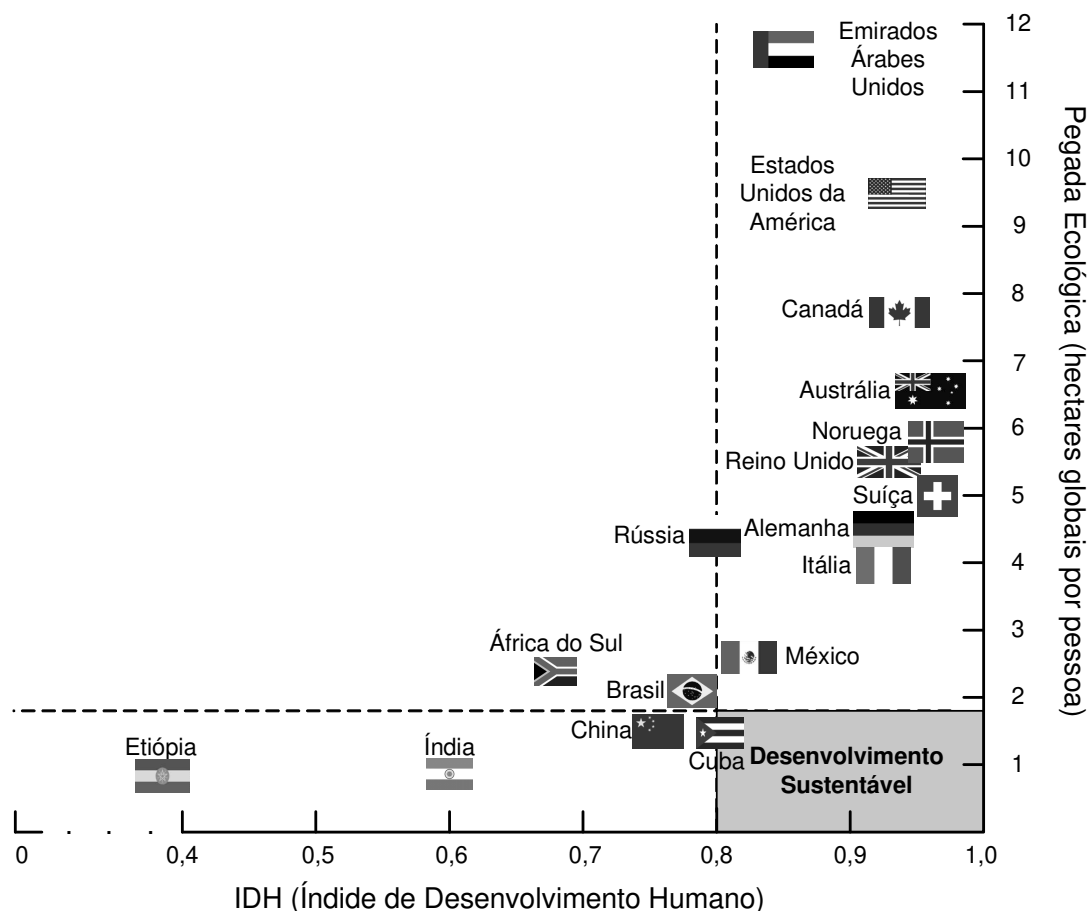


Figura 19: Pegada Ecológica versus IDH
 Fonte: Living Planet Report 2006 – World Wildlife Fund

Através das análises da tabela 6 e da figura 19, percebe-se que a pegada ecológica está relacionada com a qualidade de vida. Os países desenvolvidos são os que apresentam melhor qualidade de vida e ao mesmo tempo, são os que impõem maior pressão sobre o meio ambiente (maior pegada ecológica). Como se pode notar, nenhum país se encaixa no padrão sustentável. Atualmente, um padrão de vida elevado significa uma alta utilização de recursos não-renováveis.

4.6.2. PEGADA ECOLÓGICA BASEADA NA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA LÍQUIDA

Como a metodologia proposta por Venetoulis e Talberth (2007) baseia grande parte de suas suposições e cálculos na Produtividade Primária Líquida, seus autores se referem a ela como EF-NPP (*Ecological Footprint – Net Primary Productivity*). De acordo com Running et al. (2004, p. 547) “NPP marca o primeiro passo visível da acumulação de carbono; ela quantifica a conversão de CO₂ atmosférico em biomassa vegetal”. Logo, NPP é uma taxa que mede o fluxo líquido de carbono da atmosfera para as plantas por dia, semana ou ano. A NPP é extremamente variável de ano para ano e ao longo das estações climáticas. Em algumas estações e biomas a NPP pode ter um valor negativo, indicando que a respiração das plantas é maior do que a absorção de carbono.

A Produtividade Primária Líquida fornece a base para manutenção, crescimento e reprodução de todos os consumidores e decompositores. Por causa disso, NPP também é considerada uma medida do “recurso alimentar total” disponível no planeta (Vitousek et al., 1986). Devido à habilidade humana de apropriação da NPP para impulsionar atividades produtivas e de consumo, e devido ao fato dessas atividades afetarem a disponibilidade futura da NPP, ela se torna particularmente relevante em análises de sustentabilidade e se mostra útil como ferramenta para os cálculos da Pegada Ecológica, que buscam colocar diferentes tipos de terra em uma medida comum. Na verdade, já foi sugerido que a apropriação humana da NPP é “uma medida mais explícita da intensidade da pressão humana sobre os ecossistemas do que a Pegada Ecológica, que se baseia na demanda” (UNEP, 2005).

Por outro lado, defensores da metodologia convencional argumentam que a apropriação humana da NPP não indica os limites de sustentabilidade e que os fatores de equivalência baseados nos dados de produtividade potencial agrícola (GAEZ) são mais robustos (Haberl et al., 2004; Wackernagel et. al., 2005). Um estudo comparativo entre

Pegada Ecológica Convencional e Pegada Ecológica baseada na NPP foi conduzido por Haberl et al. (2004). Eles sugerem que as duas metodologias servem a diferentes propósitos: a pegada ecológica convencional mediria a utilização das áreas biologicamente produtivas pela sociedade, enquanto que a EF-NPP teria seu foco voltado para a medida da intensidade do uso. Segundo Venetoulis e Talberth (2007), a Produtividade Primária Líquida pode ser incorporada na Pegada Ecológica Convencional de diversas formas úteis. Eles sugerem quatro mudanças principais na metodologia original:

- (a) Incluir a superfície inteira da Terra na biocapacidade
- (b) Reservar uma fração da biocapacidade para outras espécies
- (c) Modificar as considerações sobre as taxas de seqüestro de carbono
- (d) Utilizar a NPP como base para um novo fator de equivalência

A Pegada Ecológica exclui dos cálculos áreas onde os recursos aparentemente não são utilizados para o consumo humano e assimilação de resíduos. Essa exclusão, no entanto, desconsidera o papel que essas áreas desempenham na geração da biocapacidade global e na manutenção de serviços ecossistêmicos críticos que sustentam, não só os seres humanos, mas também toda a vida do planeta. Para ilustrar esse ponto: florestas localizadas a elevações médias no oeste da América do Norte são ligadas ecologicamente às tundras alpinas no norte e a desertos no sul através do ciclo hidrológico, migração de animais selvagens e movimentos do solo. Ainda assim exclui desertos e tundras dos cálculos de biocapacidade, pois essas áreas são consideradas de baixo potencial para a agricultura.

Sob a perspectiva da NPP, toda a Terra é relevante devido ao fato da maior parte da superfície terrestre participar da ciclagem de carbono. Logo, a primeira mudança da metodologia é **incluir todas as áreas de terra e mar como parte da biocapacidade**. Essa mudança adiciona cerca de 36 bilhões de hectares de biocapacidade não contabilizados pelo método convencional, apesar de serem áreas com níveis relativamente baixos de NPP se comparadas a florestas tropicais, áreas de pastagem e cultivo.

A segunda mudança é fornecer uma reserva para outras espécies. Como já observado, a pegada ecológica adota uma postura explicitamente antropocêntrica. Conseqüentemente, uma porção da biocapacidade necessária para sustentar a diversidade no planeta não é considerada. Por causa disso, a Pegada Ecológica apresenta uma falha na análise, pois desconsiderando o espaço para a biodiversidade, as terras utilizadas para suprir a demanda humana de alimentos, lenha, madeira e peixes são consideradas sustentáveis, o que não é verdade (Venetoulis e Talberth, 2007).

Conceitualmente, como a NPP é uma fonte de alimentos disponível para todas as espécies, é correto afirmar que uma determinada parte dela deva ser retirada da apropriação humana para outras espécies suprirem suas necessidades de alimentação e habitat. Uma recente pesquisa estimou que o homem já se apropria de cerca de 32% da NPP do planeta, “um valor extremamente alto para uma espécie que representa menos de 0,5% da biomassa heterótrofa da Terra” (Imhoff et al., 2004; Rojstaczer et al., 2001).

Venetoulis e Talberth (2007) propõem uma estratégia de reserva da NPP para outras espécies que consiste na retirada de uma parte da biocapacidade. A porcentagem a ser reservada se baseia em estudos recentes que identificam as zonas com espécies em perigo de extinção. De acordo com Mittermeier et al. (2005), 34 áreas totalizando 2,3% da superfície terrestre são classificadas como zonas de risco para a biodiversidade (“hot spots”). A maior parte é constituída por florestas tropicais e subtropicais ameaçadas por atividades humanas. Venetoulis e Talberth (2007) estimam que 15,1% do espaço biologicamente produtivo deveriam ser removidos do valor de biocapacidade para proteger essas zonas de risco. Outro estudo de Rodrigues et al. (2003) sugere que uma proteção de 13,4% da área terrestre do planeta, seria suficiente para que 55% de todas as espécies que estão ameaçadas de extinção pudessem sobreviver. Em regiões “com altos níveis de riqueza de espécies ... maiores porcentagens do território deveriam ser protegidas” (Rodrigues et al., 2003).

Venetoulis e Talberth (2007) reconhecem que a determinação da porcentagem a ser reservada para outras espécies ainda é uma questão controversa no cálculo da pegada ecológica, mas utilizam o valor de 13,4%. Mesmo assim, indicam que esse valor é uma estimativa conservadora.

A Pegada Ecológica baseada na NPP faz duas mudanças com respeito ao seqüestro de carbono:

- (a) Considera que toda a superfície da Terra é capaz de seqüestrar carbono;
- (b) Determina uma nova taxa de seqüestro de carbono;

Um dos aspectos mais problemáticos do método convencional é a suposição de que o espaço produtivo serve apenas a um propósito de uma vez (van den Bergh e Verbruggen, 1999). A questão fica mais evidente na forma como a Pegada Ecológica trata as emissões de carbono. Segundo a metodologia convencional, o seqüestro de carbono é atribuído somente às florestas, mas ao mesmo tempo as florestas fornecem produtos derivados da madeira. Assim, a área de seqüestro de carbono não é contabilizada na biocapacidade. A EF-NPP resolve essa questão permitindo o múltiplo uso dos espaços, ou seja, uma floresta pode servir aos propósitos de fornecer produtos florestais, bem como seqüestrar carbono.

A segunda mudança com relação ao seqüestro de carbono se refere à taxa de seqüestro. A EF-NPP considera que toda a superfície da Terra tem a capacidade de absorver emissões de CO₂. De acordo com os modelos do IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change), o total combinado de seqüestro de carbono do planeta é de 3,0 gigatoneladas (Gt C) por ano com os oceanos sendo responsáveis por 2,3 Gt C e o solo por 0,7 Gt C. Na verdade, o potencial de seqüestro terrestre é maior, porém as mudanças no uso do solo têm diminuído esse potencial. Do total de 51,1 bilhões de hectares, os oceanos cobrem cerca de 36,7 bilhões e o solo, 14,4 bilhões. Fazendo-se uma média ponderada das capacidades de seqüestro de carbono do solo e dos oceanos chega-se a uma média de 0,06 toneladas de carbono por hectare por ano. Isso significa que para cada tonelada de carbono emitida, a EF-NPP considera uma pegada de 16,65 ha. Além disso, a EF-NPP adiciona 8,27 ha de terra por pessoa para seqüestro de carbono na biocapacidade. Esse valor é obtido dividindo-se a área total do planeta (51,1 bilhões de hectares) pela população mundial (6,3 bilhões de pessoas).

A última mudança proposta pela EF-NPP diz respeito aos Fatores de Equivalência (EQF). Na metodologia convencional, os fatores de equivalência são baseados nos potenciais de produção agrícola (*Global Agro-Ecological Zones - GAEZ*). A

nova proposta é substituir os índices de conveniência GAEZ pela NPP. Como mostrado na tabela 6, os fatores de equivalência para a EF-NPP são a taxa de NPP de cada espaço por unidade de área em relação à média global. Os valores de NPP são baseados em Amthor (1998), que fornece áreas, NPP anual e quantidade de carbono nas plantas e no solo para 16 biomas distintos.

Os fatores de equivalência baseados na NPP representam a taxa de produtividade de um tipo de área pela média global, onde a produtividade é medida em NPP. Logo:

$$\text{Fator de Equivalência (NPP)} = \frac{\text{NPP do Tipo de Área}}{\text{NPP Média de Todas as Áreas}} \quad (\text{equação 14})$$

Tabela 7: Fatores de Equivalência para Pegada Ecológica baseada na NPP

Espaço	Área (bi ha)	NPP Total (Pg C/ano)*	NPP/Área	Fator de Equivalência
Cultivo	1,48	6,28	4,243	2,1214
Floresta	3,61	23,76	6,583	3,2916
Pastagem	2,98	14,41	4,835	2,4176
Área Construída	0,20	0,20	0,997	0,4984
Pouco Produtiva	6,61	13,75	2,080	1,0400
Pesca	2,13	11,38	5,344	2,6719
Mar Aberto	34,36	32,95	0,959	0,4795
Média	-	-	2	-
Total	51,37	102,73	-	-

*Assumindo que a fitomassa seca é 45% carbono

1 Pg = 10¹⁵ g

A ciência de mapeamento da NPP está evoluindo rapidamente e atingindo um ponto onde é possível sua realização por satélite (Running et al., 2004). Venetoulis e Talberth (2007) utilizam as estimativas de Amthor (1998) para demonstrar a técnica, utilizando NPP para obter medidas da produtividade ecológica dos biomas. Segundo eles, a EF-NPP está mais próxima da idéia de valor ecológico relativo dos diferentes tipos de terra.

Para ilustrar como os fatores de equivalência são obtidos, considere o valor de 2,12 para cultivos. A tabela 6 mostra que o NPP global para cultivos é 6,3 Pg C sobre uma área de 1,48 bi ha ou 4,243 Pg C por hectare. O fator de equivalência de cultivo de 2,12 é obtido dividindo-se 4,243 Pg C pela média global de NPP de 2,00 Pg C.

A tabela 7 também mostra fatores de equivalência para áreas pouco produtivas e mar aberto – áreas excluídas pela metodologia convencional. Nota-se também uma mudança nos valores relativos de cada bioma. Por exemplo, a pegada ecológica convencional considerava que as áreas construídas são mais produtivas biologicamente do que florestas, pastagens e áreas de pesca. A EF-NPP mostra o contrário. Por isso, Venetoulis e Talberth (2007) sugerem que a EF-NPP está mais próxima do valor ecológico relativo dos diferentes tipos de terra.

O uso da EF-NPP resultou em mudanças significativas nos cálculos de pegada global. A tabela 8 mostra a biocapacidade global per capita, pegada e saldos ecológicos (biocapacidade – pegada) tanto para EF-NPP quanto para a metodologia original (EF-GAEZ). EF-NPP aponta balanços ecológicos negativos em 2001 para 4 áreas: cultivo, pesca, zona construída e energia. EF-GAEZ mostra um déficit ecológico somente para energia. As mudanças realizadas nos fatores de equivalência e na biocapacidade bem como as deduções feitas para outras espécies ajudam a explicar porque EF-NPP apresenta mais saldos ecológicos negativos do que a EF-GAEZ.

Tabela 8: Biocapacidade, Pegada e Balanço Ecológico: EF-NPP e EF-GAEZ

Área	Biocapacidade		Pegada		Balanço Ecológico	
	EF-NPP	EF-GAEZ	EF-NPP	EF-GAEZ	EF-NPP	EF-GAEZ
Cultivo	0,461	0,527	0,521	0,527	-0,060	0,000
Floresta	1,775	0,833	0,464	0,189	1,311	0,644
Pastagem	1,197	0,267	0,470	0,091	0,726	0,176
Construída	0,020	0,100	0,046	0,100	-0,026	0,000
Pouco Produtiva	0,779	-	0,000	-	0,779	-
Pesca	0,873	0,132	1,045	0,138	-0,173	-0,006
Mar Aberto	2,337	-	0,000	-	2,337	-
Energia	8,265	-	19,357	1,142	-11,092	-1,142
Total	15,707	1,859	21,903	2,187	-6,197	-0,328

Todos os valores em gha per capita, dados de 2001

Energia é a categoria com maior pegada nos dois métodos, mas na EF-NPP o valor é quase 17 vezes maior. Isso acontece principalmente devido à inclusão de todo o planeta nas estimativas de biocapacidade, reduzindo as taxas de seqüestro de carbono de 0,95 para 0,06 t C/ha. EF-NPP ainda adiciona 8,27 gha de energia per capita na biocapacidade. Isso resulta em um déficit mundial de 11,1 gha, enquanto que o método convencional apresenta um valor de 1,14 gha.

As duas abordagens mostram balanços ecológicos positivos para pastagem e florestas, com a EF-NPP apresentando maiores saldos em função dos maiores fatores de equivalência para essas categorias. Como citado anteriormente, a EF-NPP aloca 3,11 gha per capita de biocapacidade de áreas poucos produtivas e oceanos, enquanto que a metodologia convencional não inclui essas áreas. Até esse momento, a EF-NPP não calcula a pegada dessas áreas.

A EF-NPP mostra um total de 15,71 gha/cap de biocapacidade, sendo que a maior parte é de área de seqüestro de carbono. EF-GAEZ aponta um total de 1,86 gha/cap. Em termos de planeta, a pegada ecológica humana requer outro planeta com 18% do tamanho da Terra para ser sustentável, segundo a EF-GAEZ. A EF-NPP aponta um número de 1,39 planetas, ou seja, um acréscimo de 21% em relação à metodologia original.

4.6.3. PEGADA ECOLÓGICA BASEADA NA EMERGIA

Zhao et al. (2005) propuseram um método modificado de cálculo da pegada ecológica baseado na análise emergética. O principal objetivo da nova metodologia segundo os autores é transformar a demanda humana de recursos naturais e a oferta da natureza em conceitos mais compreensíveis e quantificáveis. Apesar dos dois métodos (Pegada Ecológica Convencional e Pegada Ecológica baseada na Emergia) apresentarem abordagens distintas, ambos procuram solucionar o mesmo problema: estimar a disparidade entre o consumo humano e a produção (baseada em recursos naturais). A abordagem de Zhao et al. (2005) apresenta as seguintes propostas:

- (a) Os dados de consumo podem ser transformados em fluxos emergéticos;
- (b) A biocapacidade é uma função das fontes renováveis de energia.

4.6.3.1. CÁLCULO DA BIOCAPACIDADE

A Pegada Ecológica tem suas raízes no conceito de capacidade de suporte. Como definido por biólogos, a capacidade de suporte é o número de indivíduos de uma determinada espécie que uma área pode sustentar sem ser degradada permanentemente (Odum, 1989; Rees, 1992). Se uma população excede a capacidade de suporte de um meio, então os recursos necessários à sobrevivência da espécie podem se extinguir ou os resíduos produzidos podem crescer até o ponto de envenenar a própria população, levando a seu colapso.

Uma melhor forma de entender o conceito de capacidade de suporte é separar os recursos naturais utilizados pela sociedade, em renováveis e não-renováveis. A distinção entre ambos é de certa forma artificial, pois todos os recursos na Terra são renováveis pela cadeia de processos ecológicos globais. No entanto, aqueles que são lentamente renováveis em comparação à sua taxa de utilização, são considerados não-renováveis. A capacidade de suporte não é sustentável, a menos que seja baseada no uso de recursos de uma forma renovável. Assim, no cálculo da biocapacidade, Zhao et al. (2005) consideram somente recursos renováveis como fontes de energia. Para obter

$$\text{Biocapacidade} = \frac{\text{Recursos Renováveis (seJ/ano)}}{\text{Densidade Emergética Global (seJ/ha.ano)}} \quad (\text{equação 15})$$

A densidade emergética global (DEG) é calculada da seguinte forma:

$$\text{DEG} = \frac{\text{Energia Total da Terra (seJ/ano)}}{\text{Área da Terra (ha)}} = \frac{1,583 \times 10^{25} \text{ seJ/ano}}{5,1 \times 10^{10} \text{ ha}} = 3,1 \times 10^{14} \text{ seJ/ha.ano}$$

O total de energia da Terra, $1,583 \times 10^{25}$ seJ, foi obtido por Odum et al. (2000) e considera como fontes de energia: radiação solar, calor interno da Terra e força gravitacional lunar.

Tabela 9: Energia Total do planeta

Ítem de Energia	Energia (J/ha.ano)	Transformidade (seJ/J)	Energia (seJ/ha.ano)
Radiação Solar	3,93E+24	1	3,93E+24
Calor Interno da Terra	6,72E+20	1,20E+04	8,06E+24
Força Gravitacional Lunar	5,20E+19	7,39E+04	3,84E+24
Total			1,58E+25

Fonte: Zhao et al. (2005)

Para demonstrar o mecanismo do método, Zhao et al. (2005) aplicaram a metodologia para a província de Gansu, no oeste chinês. Chen e Chen (2006) aplicaram a mesma metodologia para diagnosticar o consumo na sociedade chinesa de 1981 a 2001.

Tabela 10: Biocapacidade para a província de Gansu (2000)

Ítem	Energia (J)	Transformidade (seJ/J)	Energia (seJ)	Biocapacidade per capita (gha/cap)
Sol	1,78E+21	1	1,78E+21	0,2288
Potencial Químico da Chuva	6,78E+17	15444	1,05E+22	1,3428
Geo-Potencial da Chuva	3,36E+18	8888	2,99E+22	3,8326
Vento	1,43E+17	663	9,48E+19	0,0122
Energia Interna da Terra	9,09E+17	29000	2,64E+22	3,3802
Biodiversidade (12%)				0,4599
Total				3,3727

Fonte: Zhao et al. (2005)

Utilizando a metodologia convencional de Wackernagel et al. (2005), a biocapacidade da província de Gansu no ano 2000 foi de 1,6686 ha, ou seja, cerca da metade do valor obtido com a metodologia baseada na emergia (tabela 10).

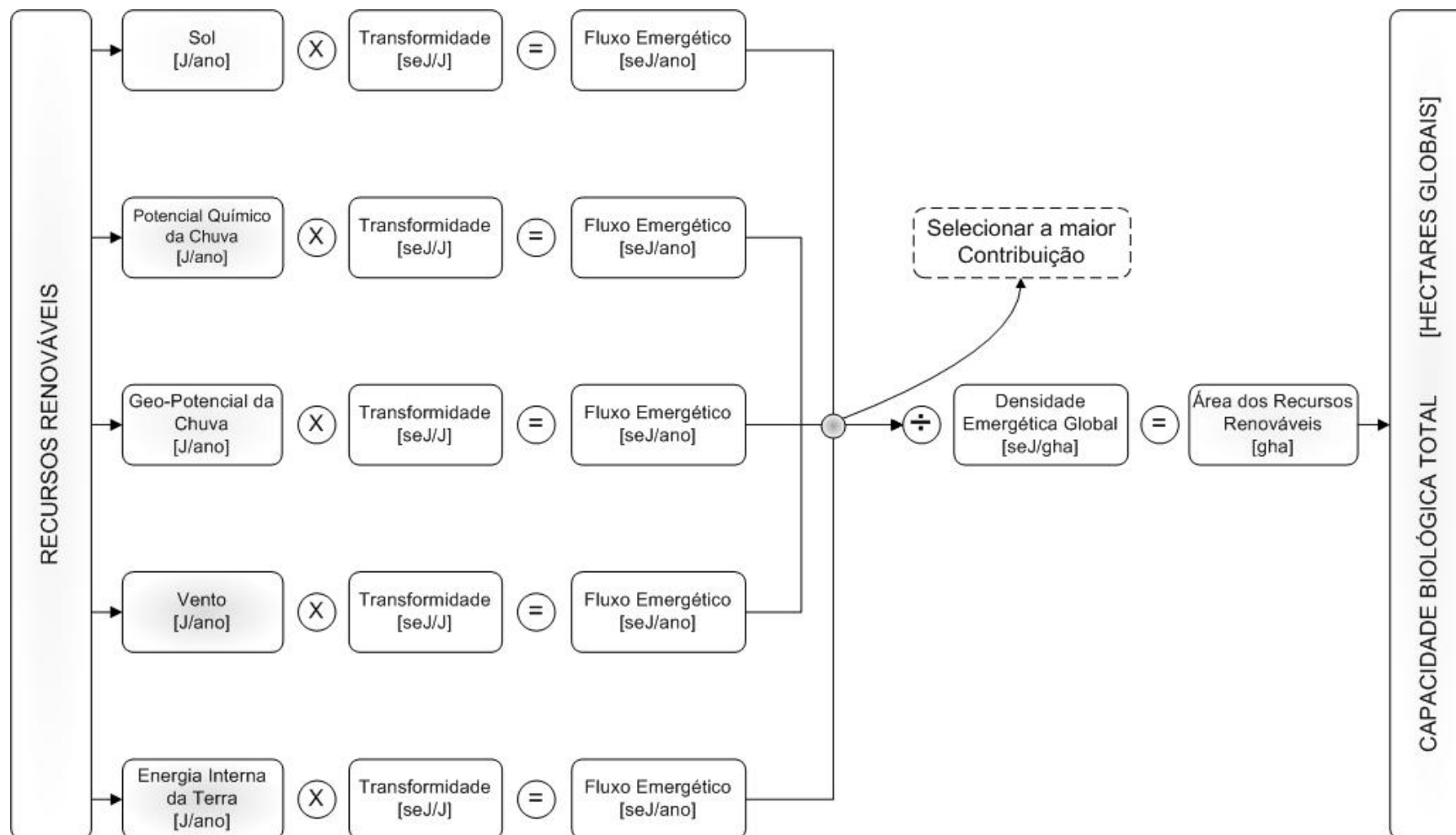


Figura 20: Estrutura de Cálculo da Biocapacidade proposta por Zhao et al. (2005)

4.6.3.2. CÁLCULO DA PEGADA

Os cálculos básicos da pegada ecológica são conceitualmente simples. Zhao et al. (2005) utilizam a mesma divisão por categorias da EF-GAEZ: cultivo, pastagem, floresta, pesca, área construída e energia.

O consumo total para cada tipo de área é dado pela seguinte fórmula:

$$\text{Consumo} = \text{Produção} + \text{Importação} - \text{Exportação}$$

Os dados brutos obtidos são transformados para valores energéticos (em Joule) e, em seguida, multiplicados pela transformidade de cada produto. Assim, obtêm-se os fluxos emergéticos.

$$\text{Pegada} = \frac{\text{Consumo (seJ/ano)}}{\text{Densidade Emergética Local (seJ/ha.ano)}} \quad (\text{equação 16})$$

A densidade emergética local ou regional é calculada da seguinte forma:

$$\text{DEL} = \frac{\text{Energia Total da Região (seJ/ano)}}{\text{Área da Região (ha)}} = \frac{2,99 \times 10^{22} \text{ seJ/ano}}{4,54 \times 10^7 \text{ ha}} = 6,586 \times 10^{14} \text{ seJ/ha.ano}$$

A energia total da província é referente ao maior recurso renovável em termos de energia que entra na região. Nesse caso, a maior entrada foi o geo-potencial da chuva (tabela 10) com $2,99 \times 10^{22}$ seJ/ano. A área da região é de $4,54 \times 10^7$ ha.

Tabela 11: Pegada para a província de Gansu (2000)

Ítem	Energia (J)	Transformidade ^a (seJ/J)	Energia (seJ)	Pegada per capita (gha/cap)
Cultivo			2,17E+22	1,3126
Cereais	7,17E+16	35900	2,57E+21	0,1555
Trigo	3,68E+16	68000	2,50E+21	0,1511
Milho	3,08E+16	58100	1,79E+21	0,1083
Feijão	6,94E+15	690000	4,79E+21	0,2895
Tubérculos	2,42E+15	2700	6,53E+18	0,0004
Oleaginosas	1,06E+16	690000	7,34E+21	0,4437
Algodão	1,08E+15	1900000	2,06E+21	0,1244
Vegetais	2,10E+16	27000	5,67E+20	0,0342
Beterraba	1,06E+15	84900	9,02E+19	0,0055
Produtos Florestais			1,51E+21	0,0914
Frutas	2,80E+15	530000	1,48E+21	0,0897
Madeira	8,11E+14	34900	2,83E+19	0,0017
Produtos Animais			1,12E+22	0,7548
Carne	2,80E+15	3170000	8,89E+21	0,5374
Leite	6,33E+14	1700000	1,08E+21	0,0650
Ovos	5,14E+14	2000000	1,03E+21	0,0622
Lã	3,39E+14	4400000	1,49E+21	0,0902
Pesca	6,49E+13	2000000	1,30E+20	0,0078
Recursos Energéticos			4,94E+22	2,9872
Carvão	5,08E+17	39800	2,02E+22	1,2224
Petróleo	3,69E+17	53000	1,95E+22	1,1812
Gás Natural	3,31E+15	48000	1,59E+20	0,0096
Energia Elétrica	5,97E+16	159000	9,50E+21	0,5740
Total				5,1538

^a Os valores de transformidade são retirados ou modificados de Odum (1996)

Fonte: Zhao et al. (2005)

Utilizando a metodologia convencional de Wackernagel et al. (2005), a pegada da província de Gansu no ano 2000 foi de 1,7456 ha. De acordo com ambas as metodologias fica claro que a província de Gansu apresenta um déficit ecológico, porém com a metodologia baseada na emergia, esse cenário é pior do que o apresentado pelo pegada ecológica convencional.

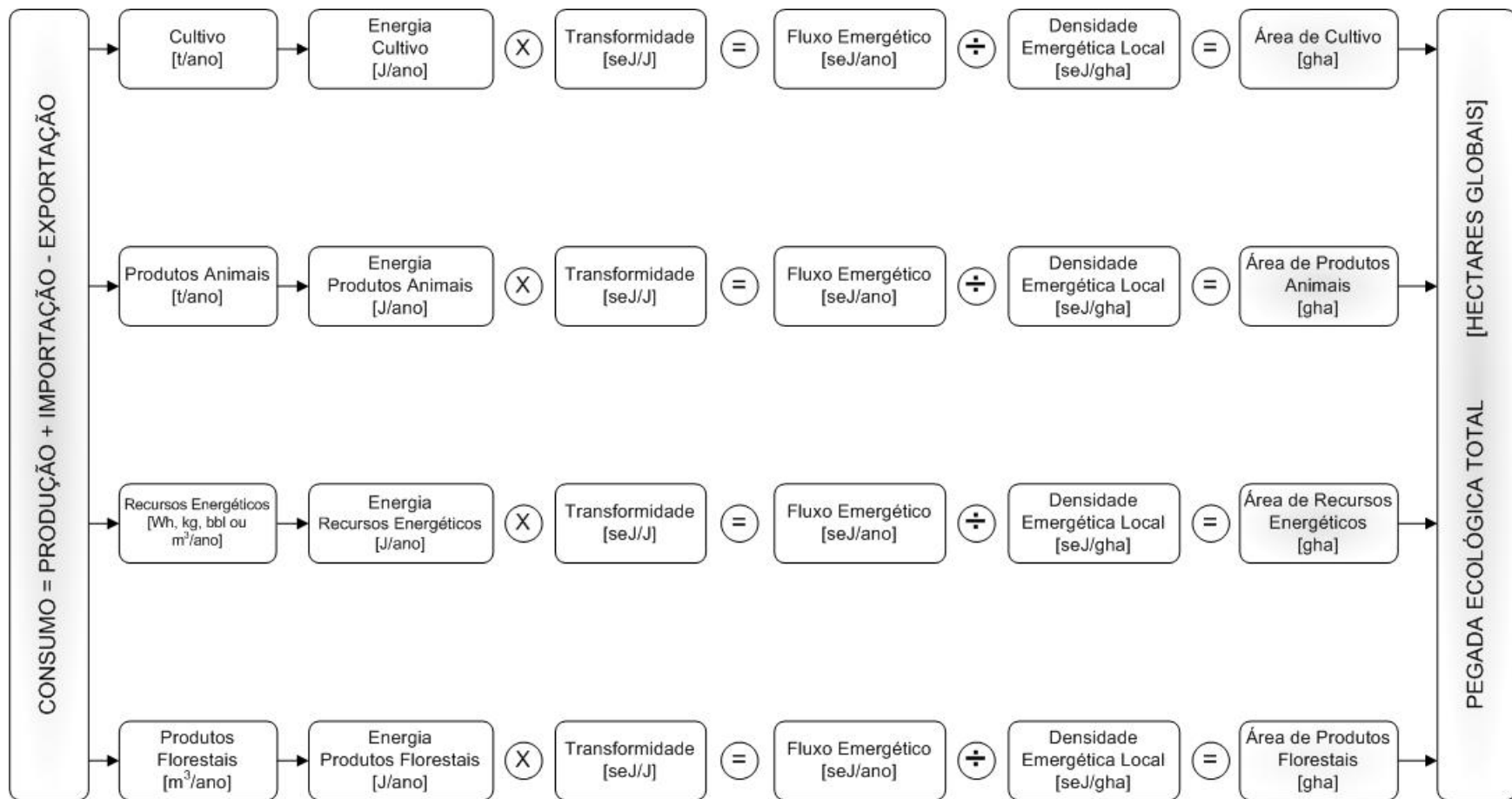


Figura 21: Estrutura de Cálculo da Pegada proposta por Zhao et al. (2005)

A principal diferença entre o método proposto por Zhao et al. (2005) e a pegada ecológica convencional é que a metodologia baseada na emerggia se inicia pelos fluxos de energia de um sistema. Através do estudo desses fluxos e utilizando a análise emergética e o conceito de densidade emergética, os fluxos de energia são traduzidos para áreas produtivas correspondentes. Em contrapartida, no cálculo convencional, inicia-se pelos fluxos de materiais. Esses fluxos são traduzidos a áreas biologicamente produtivas, através de fatores de equivalência e rendimento.

Como já abordado anteriormente nesse trabalho, os fatores de equivalência evidenciam as diferenças de produtividade entre as categorias de espaço e os fatores de rendimento representam a diferença entre produtividade local e global de uma mesma categoria de espaço. Segundo Haberl et al. (2004), muitas informações sobre o impacto humano nos ecossistemas regionais são perdidas ao utilizarem-se produtividades mundiais médias. Além disso, a metodologia convencional não permite uma avaliação dos suprimentos de energia, pois os cálculos não determinam a área correspondente de consumo dos combustíveis fósseis. Eles avaliam a área necessária para a produção de recursos renováveis que são indicados para substituir os combustíveis fósseis (Stöglehner, 2003).

Por outro lado, a Análise Emergética ajuda a superar algumas dessas deficiências. A característica mais atraente, segundo Zhao et al. (2005), é que a unidade comum (seJ) permite a comparação de todos os recursos na mesma base. Portanto, uma área baseada na emerggia traça uma imagem mais realista da pegada ecológica.

5. OBJETIVO

Propor e aplicar uma nova metodologia de avaliação de impacto das atividades humanas no ambiente baseada na Pegada Ecológica com a introdução de métodos e conceitos presentes na Análise Emergética.

5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (a) fazer uma revisão completa dos métodos já publicados que utilizam a Pegada Ecológica;
- (b) identificar os passos a serem seguidos pela nova metodologia, introduzindo a Análise Emergética na Pegada Ecológica;
- (c) estimar a biocapacidade ou oferta ecológica do Brasil;
- (d) calcular valores de transformidade (ou energia específica) para a produção de biomassa nos biomas brasileiros e compará-los com valores estimados para biomas semelhantes;
- (e) estimar o consumo ou pegada da população brasileira;
- (f) comparar os resultados com outros já obtidos por metodologias convencionais de Pegada Ecológica.

6. METODOLOGIA

6.1. SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

O Brasil é uma república federativa formada pela união de 26 estados federados e pelo Distrito Federal. O país conta 5.564 municípios, 183.987.291 habitantes, bem como uma área de 8.514.876,599 km², que equivale a 47% do território sul-americano. Em comparação com os demais países do globo, dispõe do quinto maior contingente populacional e da quinta maior área (IBGE, 2004).

A geografia é diversificada, com paisagens semi-áridas, montanhosas, de planície tropical, subtropical, com climas variando do seco sertão nordestino ao chuvoso clima tropical equatorial, ao clima mais ameno da Região Sul, com clima subtropical e geadas freqüentes. O Brasil é o país de maior biodiversidade do planeta: uma entre cada cinco espécies encontram-se nele. Foi o primeiro signatário da Convenção sobre a Diversidade Biológica (CDB) e é responsável por aproximadamente 14% da biota mundial de acordo com o Conservation International (CI). Devido à sua dimensão continental e à grande variação geomorfológica e climática, o Brasil abriga seis biomas e 78 ecorregiões (IBAMA, 2008). Os biomas são: Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Pantanal, Pampas e Caatinga (figura 22).

O Brasil é a oitava maior economia mundial de acordo com o Produto Interno Bruto calculado com base no método da paridade do poder de compra segundo o Fundo Monetário Internacional, sendo a maior da América Latina (FMI, 2008). No entanto, tem um PIB per capita inferior a alguns países dessa região (Argentina, Chile e Uruguai) e possui um IDH de 0,800, ocupando a 70^a posição mundial (ONU, 2004).



Figura 22: Biomas Brasileiros de acordo com o IBGE (2004)

Apesar de ter, ao longo da década de 1990, um salto qualitativo na produção de bens agrícolas, alcançando a liderança mundial em diversos produtos, com reformas comandadas pelo governo federal, a pauta de exportação brasileira foi diversificada, com uma enorme inclusão de bens de alto valor agregado como jóias, aviões, automóveis e peças de vestuário. Atualmente o país está entre os 20 maiores exportadores do mundo, com US\$ 142 bilhões vendidos entre produtos e serviços a outros países.

O agronegócio representa 34% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, 37% de todos os empregos do País e é responsável por 43% das exportações nacionais, sendo o setor superavitário entre todos os setores exportadores do Brasil. A previsão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento é que aos atuais 62 milhões de hectares cultivados no país se somarão outros 30 milhões de hectares nos próximos 15 anos, cedidos por áreas de pastagens, graças ao desenvolvimento tecnológico da pecuária de corte e da pecuária de leite. Na safra de 2007, a produção de grãos foi de 132,9 milhões de toneladas e a área plantada do país foi de 57,882 milhões de hectares (IBGE, 2008).

No final de 2004 o PIB cresceu 5,7%, a indústria cresceu na faixa de 8% e as exportações superaram todas as expectativas. Porém em 2005 a economia desacelerou, com um crescimento de 3,2%, sendo que em 2006 houve pequena melhoria, com um

crescimento de 3,7%, muito abaixo da média mundial para países emergentes, de 6,5%. Em 2007, superando as expectativas dos especialistas, a economia se mostrou aquecida e voltou a crescer como em 2004, com crescimento previsto de 5,4%, após 4,5% inicialmente, tendo a indústria o maior crescimento. A taxa de investimento no Brasil situa-se em torno dos 17% do PIB. Em 2006, o PIB atingiu R\$ 2,322 trilhões (US\$ 1,067 trilhão) (IBGE, 2008).

A descrição do Brasil como um país de dimensões continentais e abundância de recursos naturais nos leva a imaginar que em um cálculo de pegada ecológica, o resultado seria sempre um saldo ecológico positivo. Segundo a metodologia convencional descrita por Monfreda et al. (2004) e o método baseado na NPP de Venetoulis e Talberth (2007), essa afirmação é verdadeira. No entanto, uma metodologia mais robusta com uma análise mais aprofundada talvez traga resultados não tão otimistas.

6.2. METODOLOGIA PROPOSTA

O método proposto por Zhao et al. (2005) é muito interessante, pois introduz o conceito de emergia no cálculo da Pegada Ecológica, mas não é uma solução completa para as deficiências encontradas no método convencional. Neste trabalho, algumas modificações são propostas com o objetivo de, não só introduzir mais profundamente o conceito de emergia, mas também incorporar a metodologia da Análise Emergética nos cálculos.

6.2.1. PRIMEIRA ETAPA: DIAGRAMA

A primeira etapa de uma avaliação emergética é também o primeiro passo da metodologia proposta. Para aplicá-la é fundamental identificar os componentes do sistema, ou seja, conhecer as entradas e saídas. Isso é possível durante a etapa de levantamento de dados seja a partir do trabalho de campo ou através de banco de dados oficiais. Feito isso, pode-se desenhar o diagrama sistêmico (Figura 23) do local ou país a ser analisado.

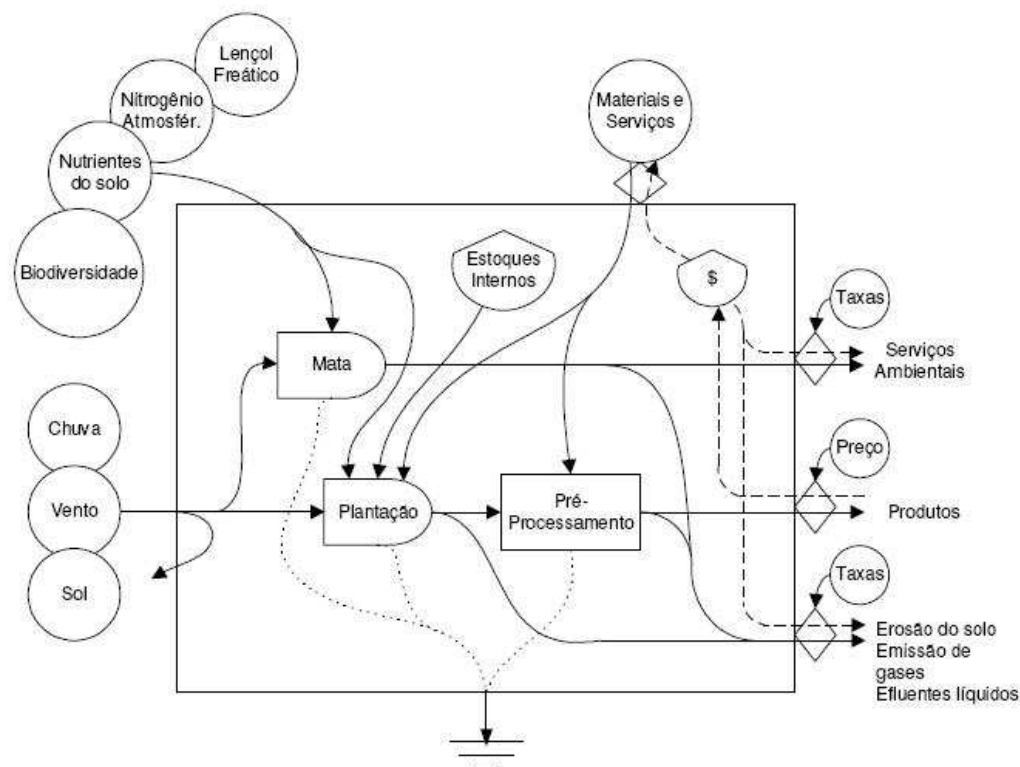


Figura 23: Diagrama de fluxos de energia de um sistema de produção genérico
Adaptado de Ortega (2002)

No diagrama, é necessário colocar os limites do sistema para identificar todos os fluxos de entrada e saída importantes. Cada um desses fluxos se converte em uma linha que vai desde a fonte até os componentes que a utilizam.

Essa etapa também consiste na divisão dos espaços a serem analisados pelo método. É importante determinar quais tipos de espaços serão considerados tanto para o cálculo da pegada (consumo) como para o cálculo da biocapacidade. Essa divisão é apresentada também no diagrama sistêmico. A área natural engloba os ecossistemas preservados, as zonas costeiras e áreas com atividade produtiva que também recebem fontes renováveis. Já a área antrópica delimita a zona da economia humana com atividades de produção industrial e agrícola com utilização de recursos não-renováveis (figura 24).

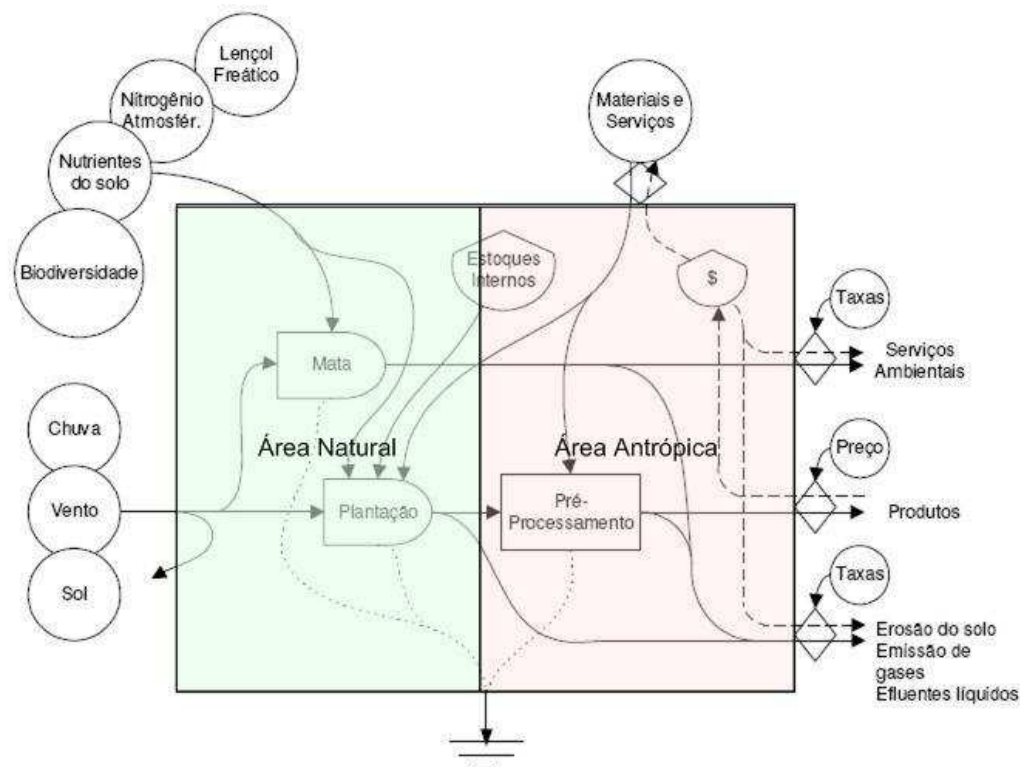


Figura 24: Diagrama de fluxos de energia de um sistema de produção genérico com a divisão de “Área Natural” e “Área Antrópica”

Uma das críticas ao método convencional de Wackernagel e Rees (1996) é a generalização ou simplificação das características dos países. A metodologia aqui proposta inclui a divisão do país em biomas e espaços produtivos relevantes. No cálculo da biocapacidade cada bioma será analisado separadamente, respeitando os aspectos únicos de cada um deles. No caso do Brasil, isso é fundamental dada à diversidade de climas e vegetações.

6.2.2. SEGUNDA ETAPA: DENSIDADE EMERGÉTICA

A densidade emergética (*empower density*) é o fluxo de emergia por unidade de tempo e área. Um sistema organiza suas estruturas e funções em relação à quantidade e qualidade dos fluxos de entrada de emergia. A comparação entre densidade emergética de uma certa área e os ecossistemas vizinhos pode indicar o nível de atividade humana naquela área. Ela também pode fornecer informações sobre a emergia necessária para manter a estrutura e funções de uma determinada área. Segundo Odum (1994), mudanças muito grandes na densidade emergética alteram de forma abrupta a estrutura e organização do sistema.

Brown e Ulgiati (2001) determinaram a capacidade de suporte renovável para investimentos econômicos. Segundo eles, a capacidade de suporte pode ser expressa como a área necessária para suportar a atividade econômica ou área de suporte. A capacidade de suporte renovável é obtida dividindo-se a energia total não-renovável das entradas (incluindo recursos não-renováveis da natureza e da economia) pela densidade emergética renovável da região. Como se pode notar, a densidade emergética funciona como um fator de transformação de valores emergéticos para unidades de área:

$$SA_{(r)} = (F + N) / Empd_{(r)} \quad \text{(equação 17)}$$

Onde:

$SA_{(r)}$ = Área de Suporte Renovável (m^2)

$Empd_{(r)}$ = Densidade Emergética Renovável ($seJ/m^2.ano$)

F = Materiais e Serviços da Economia (seJ/ano)

N = Recursos Não-Renováveis da Natureza (seJ/ano)

O resultado indicado pela área de suporte ($SA_{(r)}$) é a área da região que seria requerida se a atividade econômica fosse realizada somente com fontes renováveis de energia, ou seja, revela a área natural equivalente ao processo produtivo que está sendo realizado.

A metodologia proposta nesse trabalho utilizará a densidade emergética renovável global como a fator de conversão de fluxos emergéticos para áreas requeridas para a produção daquela quantidade de energia. O uso desse fator de conversão também foi proposto por Zhao et al. (2005). O valor foi estimado através da divisão da energia renovável total que ingressa no planeta por ano pela área da superfície mundial:

$$DEG = \frac{\text{Energia Renovável Total da Terra (seJ/ano)}}{\text{Área da Terra (gha)}} = \frac{1,583 \times 10^{25} \text{ seJ/ano}}{5,1 \times 10^{10} \text{ gha}} = 3,1 \times 10^{14} \text{ seJ/gha.ano}$$

O total de energia renovável da Terra, $1,583 \times 10^{25}$ seJ, foi obtido por Odum et al. (2000) e considera como fontes de energia: radiação solar, calor interno da Terra e força gravitacional lunar, ou seja, a densidade emergética global inclui apenas entradas

renováveis, o que está de acordo com o conceito de Pegada Ecológica, que estabelece a área biologicamente produtiva equivalente ao consumo e à oferta da natureza. A unidade dos valores de área obtidos através da divisão pela densidade emergética global, será portanto, um hectare global (gha), ou seja, um hectare com uma distribuição de energia média mundial.

No caso do cálculo da pegada, Zhao et al. (2005) propuseram a utilização de uma densidade emergética local, para converter os valores de energia para área. Siche et al. (2007) criticam uso desse fator. Segundo eles, o uso da densidade emergética local traria resultados em hectares locais, apenas sendo válido para uma análise interna, porém não permitiria uma comparação com os resultados da biocapacidade, caso a última fosse calculada em termos de hectares globais. Calculando-se pegada e biocapacidade através do uso da densidade emergética renovável global teria, ambas teriam a mesma base permitindo a comparação entre elas.

No ponto de vista deste trabalho, a utilização da densidade emergética renovável global como fator de conversão de energia para área é mais adequada para indicar a intensidade e o impacto de uma atividade sobre o meio ambiente, pois os intuitos do método são o cálculo da Pegada Ecológica para países e a comparação dos resultados de cada um deles.

Segundo Brown e Ulgiati (2001), diferentes tipos de áreas apresentam grandes diferenças em suas densidades emergéticas:

Tabela 12: Densidade Emergética para diferentes áreas

Área	Densidade Emergética Local (E+11 seJ/m².ano)
Rural	1 – 10
Agricultura e Extrativismo industrial	10 – 1000
Centros Urbanos	1000 – 100000

Fonte: Brown e Ulgiati (2001)

As densidades emergéticas apresentadas na tabela 12 não são totalmente renováveis, pois variam de acordo com a utilização de insumos e recursos não-renováveis. Muitos países em desenvolvimento apresentam mais de 50% de suas

economias baseada em recursos renováveis, enquanto países industrializados têm um percentual muito menor (Brown et al., 1995). Portanto, a utilização da densidade emergética renovável global no método da Pegada Ecológica evidenciará não só as diferenças entre os tipos de áreas, mas também entre os países.

6.2.3. TERCEIRA ETAPA: BIOCAPACIDADE

Assim como na metodologia convencional da Pegada Ecológica, para o cálculo da biocapacidade deve-se classificar o território do país segundo categorias de espaços. Além dessas categorias, uma das modificações propostas é a de introduzir biomas mundiais não ocupados pelo homem como uma nova categoria. Geleiras, desertos, oceanos e outras áreas consideradas de baixa produtividade agrícola são excluídas dos cálculos convencionais, porém são fundamentais pelos serviços que prestam ao planeta como um todo. Dentre essas funções podemos destacar: regulação climática, reflexão solar, manutenção das correntes marinhas, absorção de CO₂, etc.

A divisão das áreas é feita em quatro categorias:

- 1) **Ecosistemas Naturais Preservados;**
- 2) **Cultivo, Pastagem e Floresta** (Atividade Comercial);
- 3) **Área Humana** (Urbana);
- 4) **Espaços Não Ocupados pelo Homem** (Áreas Congeladas, Oceanos, Desertos)

A proposta é calcular a biocapacidade como função das entradas renováveis de cada um dos espaços. Para isso são considerados os seguintes recursos renováveis:

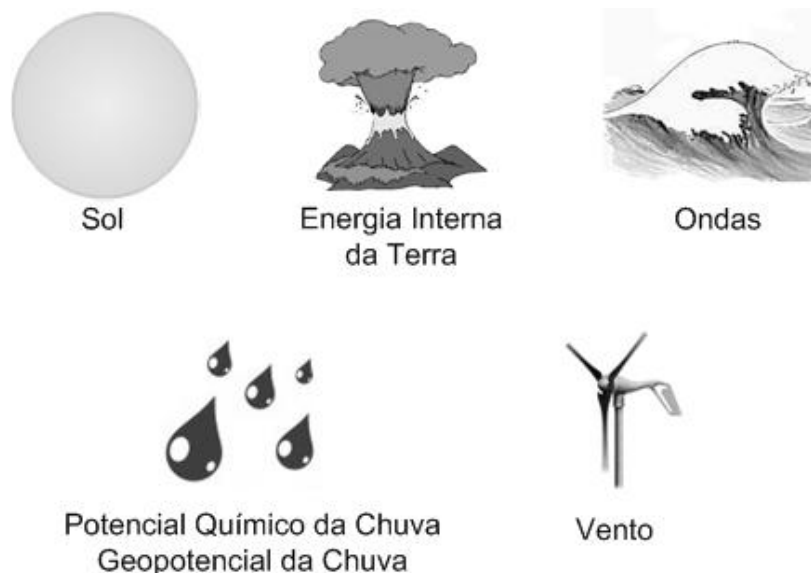


Figura 25: Recursos Renováveis considerados para o cálculo da Biocapacidade

A fim se de evitar dupla contagem, o item com maior quantidade de energia é considerado o total de energia do espaço analisado. Abaixo estão as fórmulas a serem utilizadas para o cálculo dos recursos apresentados anteriormente.

$$\text{Energia Solar [J/ano]} = (\text{Área terrestre do Espaço} + \text{Área da Plataforma Continental}) [\text{m}^2] \times (\text{Insolação Média}) [\text{kcal/m}^2/\text{ano}] \times (1 - \text{Albedo}) \times (4186) [\text{kcal/J}] \quad (\text{equação 18})$$

$$\text{Energia Interna da Terra [J/ano]} = (\text{Área terrestre do Espaço}) [\text{m}^2] \times (\text{Fluxo de Calor}) [\text{J/m}^2] \quad (\text{equação 19})$$

$$\text{Energia das Ondas [J/ano]} = (\text{Comprimento da Costa}) [\text{m}] \times (1/8) \times (\text{Densidade da Água do Mar}) [\text{kg/m}^3] \times (\text{Gravidade}) [\text{m/s}^2] \times (\text{Altura Média das Ondas})^2 [\text{m}^2] \times (\text{Velocidade}) [\text{m/s}] \times (3,14\text{E}+07) [\text{s/ano}] \quad (\text{equação 20})$$

$$\text{Potencial Químico da Chuva [J/ano]} = (\text{Área do Espaço}) [\text{m}^2] \times (\text{Pluviosidade}) [\text{m/ano}] \times (\text{Densidade da Água}) [\text{kg/m}^3] \times (\text{Potencial Químico da Água}) [\text{J/kg}] \quad (\text{equação 21})$$

$$\text{Geopotencial da Chuva [J/ano]} = (\text{Área terrestre do Espaço}) [\text{m}^2] \times (\text{Fluxo Superficial da Precipitação}) [\% \text{ em decimal}] \times (\text{Pluviosidade}) [\text{m/ano}] \times (\text{Média de Elevação do Relevo}) [\text{m}] \times (\text{Gravidade}) [\text{m/s}^2] \times (\text{Densidade da Água}) [\text{kg/m}^3] \quad (\text{equação 22})$$

Energia do Vento [J/ano] = (Área terrestre do Espaço) [m²] x (Densidade do Ar) [kg/m³] x (Coeficiente de Arrasto) x (Velocidade Média)³ [m³/s³] x (3,14E+07) [s/ano] (equação 23)

A conversão da energia para fluxos emergéticos é realizada multiplicando-se os valores obtidos anteriormente pela transformidade de cada tipo de energia. Após isso, pode-se calcular a energia por pessoa, dividindo-se cada fluxo emergético pela população do país. Lembrando que apenas o maior fluxo emergético das entradas é considerado para a estimativa da biocapacidade, para se evitar a dupla contagem, a biocapacidade é obtida dividindo-se o maior fluxo renovável pela densidade emergética global.

$$\text{Biocapacidade (gha)} = \frac{\text{Maior Fluxo Renovável (seJ)}}{\text{Densidade Emergética Global (seJ/gha)}} \quad (\text{equação 24})$$

ou

$$\text{Biocapacidade por pessoa (gha/cap)} = \frac{\text{Maior Fluxo Renovável por pessoa (seJ/cap)}}{\text{Densidade Emergética Global (seJ/gha)}} \quad (\text{equação 25})$$

Á partir dos dados obtidos é possível construir-se uma tabela (tabela 12) para melhor visualização dos resultados:

Tabela 13: Modelo de tabela para a apresentação dos resultados da Biocapacidade

Item	Sistema	Área Considerada (m ²)	Energia Renovável (J/ano)	Energia Total (seJ/ano)	Energia por Pessoa (seJ/cap)	Biocapacidade (gha/cap)
1	Ecosistemas Naturais					
1.1	Ecosistema 1					
...	...					
2	Cultivo, Pastagem e Floresta					
2.1	Produto 1					
...	...					
3	Área Humana					
3.1	Urbana					
4	Espaços Não Dominados pelo Homem					
4.1	Área 1					
...	...					
TOTAL						

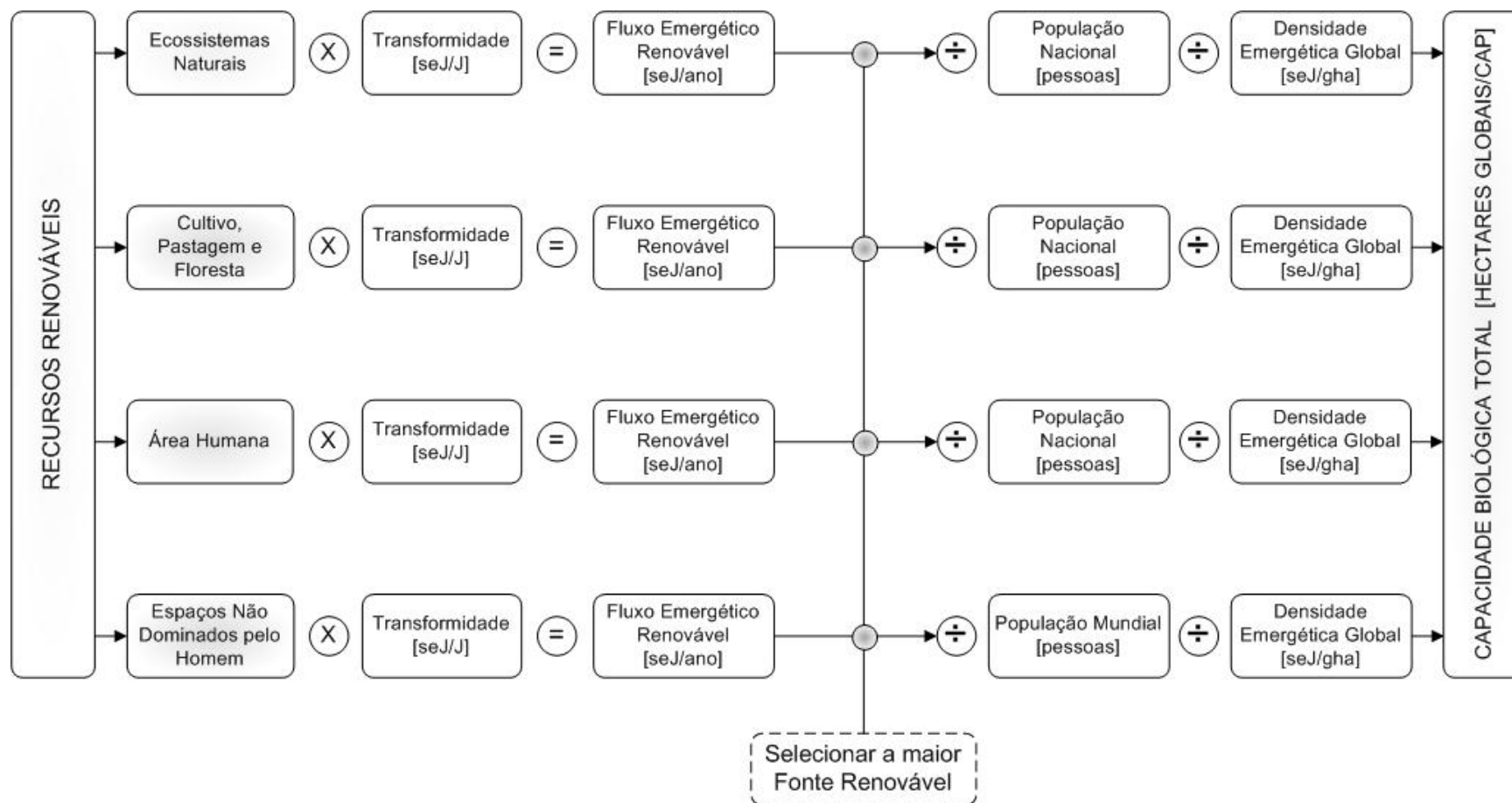


Figura 26: Estrutura de Cálculo da Biocapacidade segundo metodologia proposta nesse trabalho

A biocapacidade do item “Espaços Não Ocupados pelo Homem” é calculada de uma forma um pouco diferente da dos outros itens. Por serem espaços globais, a proposta é calcular as entradas renováveis de cada um deles, selecionando a maior como energia total do espaço para, da mesma forma, evitar dupla contagem. Porém, a sugestão é dividir esse valor pela população global e não pela população do país analisado, ou seja, considerar que esses espaços prestam funções ou serviços ao mundo inteiro. Dessa forma, tem-se a energia por pessoa (seJ/cap), que posteriormente segue os mesmos cálculos dos itens anteriores.

CÁLCULO DE TRANSFORMIDADES DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA

Com os fluxos de energia das entradas calculados é possível estimarem-se valores de transformidade da produção biomassa para os ecossistemas naturais avaliados. É importante ressaltar que as áreas consideradas para o cálculo da energia dos ecossistemas naturais são as áreas preservadas.

Primeiramente deve-se estimar a quantidade de biomassa presente em cada um dos sistemas. Para isso, utilizaremos dados de Amthor (1998), que apresenta valores de NPP em $\text{kgC/m}^2/\text{ano}$ para diversos ecossistemas. Considerando-se que 55% da biomassa é carbono (Ponce-Hernandez et al., 2004), é possível obter-se a quantidade de biomassa presente nessas áreas e, em seguida, obter a energia contida na biomassa.

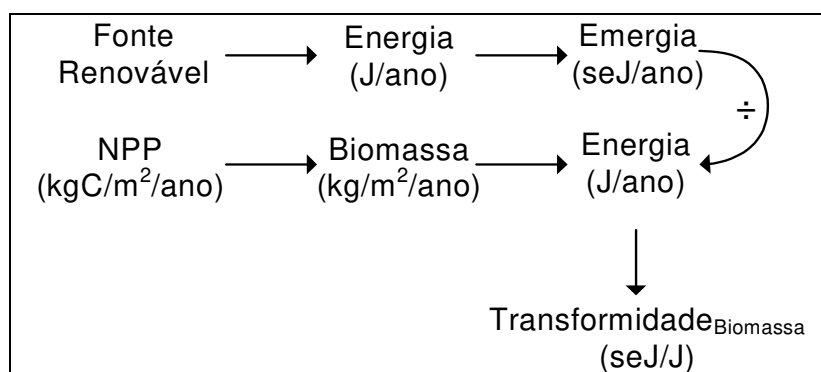


Figura 27: Passos para o cálculo da transformidade da produção de biomassa

Energia da Biomassa [J] = (Área do Sistema) [m²] x (NPP) [kgC/m²/ano] ÷ (Fração de Carbono) [% em decimal] x (Conversão) [kcal/kg] x (Conversão) [J/kcal] (equação 26)

Energia da Biomassa [J] = (Área do Sistema) [m²] x (NPP) [kgC/m²/ano] ÷ (0,55) x (4000) [kcal/kg] x (4186) [J/kcal]

Finalmente, a transformidade da produção da biomassa é obtida dividindo-se a energia (seJ/ano) que ingressa no sistema pela energia da biomassa (J/ano) (figura 27).

6.2.4. QUARTA ETAPA: PEGADA

A quarta etapa refere-se ao consumo da população em questão, ou seja indica o impacto da economia humana sobre o ambiente. O procedimento para o cálculo da pegada proposto por Wackernagel e Rees (1996) utiliza dados estatísticos de população e produção para calcular a média anual de consumo de diversos itens distribuídos em categorias. Da mesma forma, a proposta desse trabalho é dividir a pegada em categorias de consumo.

Assim como no cálculo da biocapacidade, o consumo foi dividido em quatro categorias:

- 1) **Cultivo;**
- 2) **Produtos Florestais;**
- 3) **Produtos Animais;**
- 4) **Recursos Energéticos.**

Os cálculos básicos da pegada são conceitualmente simples. A maioria dos dados necessários estão disponíveis em banco de dados de governos e instituições nacionais e internacionais.

O consumo para cada categoria é calculado através da seguinte equação:

$$\text{Consumo} = \text{Produção} + \text{Importação} - \text{Exportação}$$

Dentro de cada categoria serão escolhidos os produtos a serem considerados de acordo com a relevância para a economia do país, ou seja, aqueles com aqueles com maior produção e importância na balança comercial serão utilizados para os cálculos.

Os dados de produção, exportação e importação normalmente estão disponíveis em Mg/ano, m³/ano, barris/ano, kWh/ano, etc. Para realização dos cálculos essas unidades devem ser convertidas para unidades de energia (Joule). A conversão se dará da seguinte forma:

Cultivos:

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{Mg/ano}] \times (\text{Conteúdo Energético}) [\text{kcal/g}] \times (\text{Massa Seca}) [\% \text{ em decimal}] \times (\text{Conversão}) [\text{J/kcal}] \quad (\text{equação 27})$$

Considerando-se que os produtos possuem 20% de umidade:

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{Mg/ano}] \times (4,00) [\text{kcal/g}] \times (0,80) \times (4186) [\text{J/kcal}]$$

Produtos Florestais:

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{Mg/ano}] \times (\text{Conversão}) [\text{g/m}^3] \times (\text{Conteúdo Energético}) [\text{kcal/g}] \times (\text{Massa Seca}) [\% \text{ em decimal}] \times (\text{Conversão}) [\text{J/kcal}] \quad (\text{equação 28})$$

Considerando-se que os produtos possuem 20% de umidade:

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{Mg/ano}] \times (0,5\text{E}+06) [\text{g/m}^3] \times (3,60) [\text{kcal/g}] \times (0,80) \times (4186) [\text{J/kcal}]$$

Produtos Animais:

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{Mg/ano}] \times (\text{Conteúdo Energético}) [\text{kcal/g}] \times (\% \text{ proteína}) [\% \text{ em decimal}] \times (\text{Conversão}) [\text{J/kcal}] \quad (\text{equação 29})$$

Considerando-se que os produtos possuem 22% de proteína:

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{Mg/ano}] \times (5,00) [\text{kcal/g}] \times (0,22) [\% \text{ em decimal}] \times (4186) [\text{J/kcal}]$$

Recursos Energéticos:

Carvão

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{Mg/ano}] \times (\text{Conteúdo Energético}) [\text{J/Mg}] \quad (\text{equação 30})$$

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{Mg/ano}] \times (2,9\text{E}+10) [\text{J/Mg}]$$

Petróleo

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{barris/ano}] \times (\text{Conteúdo Energético}) [\text{J/Mg}] \quad (\text{equação 31})$$

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{barris/ano}] \times (6,1\text{E}+09) [\text{J/barril}]$$

Gás Natural

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{m}^3/\text{ano}] \times (\text{Conteúdo Energético}) [\text{kcal/m}^3] \times (\text{Conversão}) [\text{J/m}^3] \quad (\text{equação 32})$$

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{m}^3/\text{ano}] \times (8966) [\text{kcal/m}^3] \times (4186) [\text{J/kcal}]$$

Hidroeletricidade

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{kWh/ano}] \times (\text{Conteúdo Energético}) [\text{J/kWh}] \quad (\text{equação 33})$$

$$\text{Energia [J]} = (\text{Produção}) [\text{kWh}] \times (3,6\text{E}+06) [\text{J/kWh}]$$

O procedimento para converter cada fluxo para unidade de área é similar ao utilizado para o cálculo da biocapacidade. Cada categoria de consumo expressa em Joules e convertida a fluxos de energia através da transformidade. A energia por pessoa foi obtida dividindo-se os fluxos emergéticos pela população brasileira. A densidade emergética global foi utilizada para converter cada categoria para hectares globais.

Os valores de transformidade a serem utilizados serão retirados de Odum et al. (1996) e de outros trabalhos. O ideal seria calculá-los especificamente para os produtos brasileiros. Porém não haveria tempo hábil para que isso fosse feito durante o período estipulado para esse trabalho.

Tabela 14: Modelo de tabela para a apresentação dos resultados da Pegada

Item	Sistema	Produção	Unidade	Energia da Produção (J/ano)	Energia da Produção (seJ/ano)	Pegada da Produção (gha/cap)	Pegada da Exportação (gha/cap)	Pegada da Importação (gha/cap)	Pegada Nacional (gha/cap)
1	Cultivo								
1.1	Produto 1								
...	...								
2	Produtos Florestais								
2.1	Produto 1								
...	...								
3	Produtos Animais								
3.1	Produto 1								
...	...								
4	Recursos Energéticos Não-Renováveis								
4.1	Recurso 1								
...	...								
TOTAL									

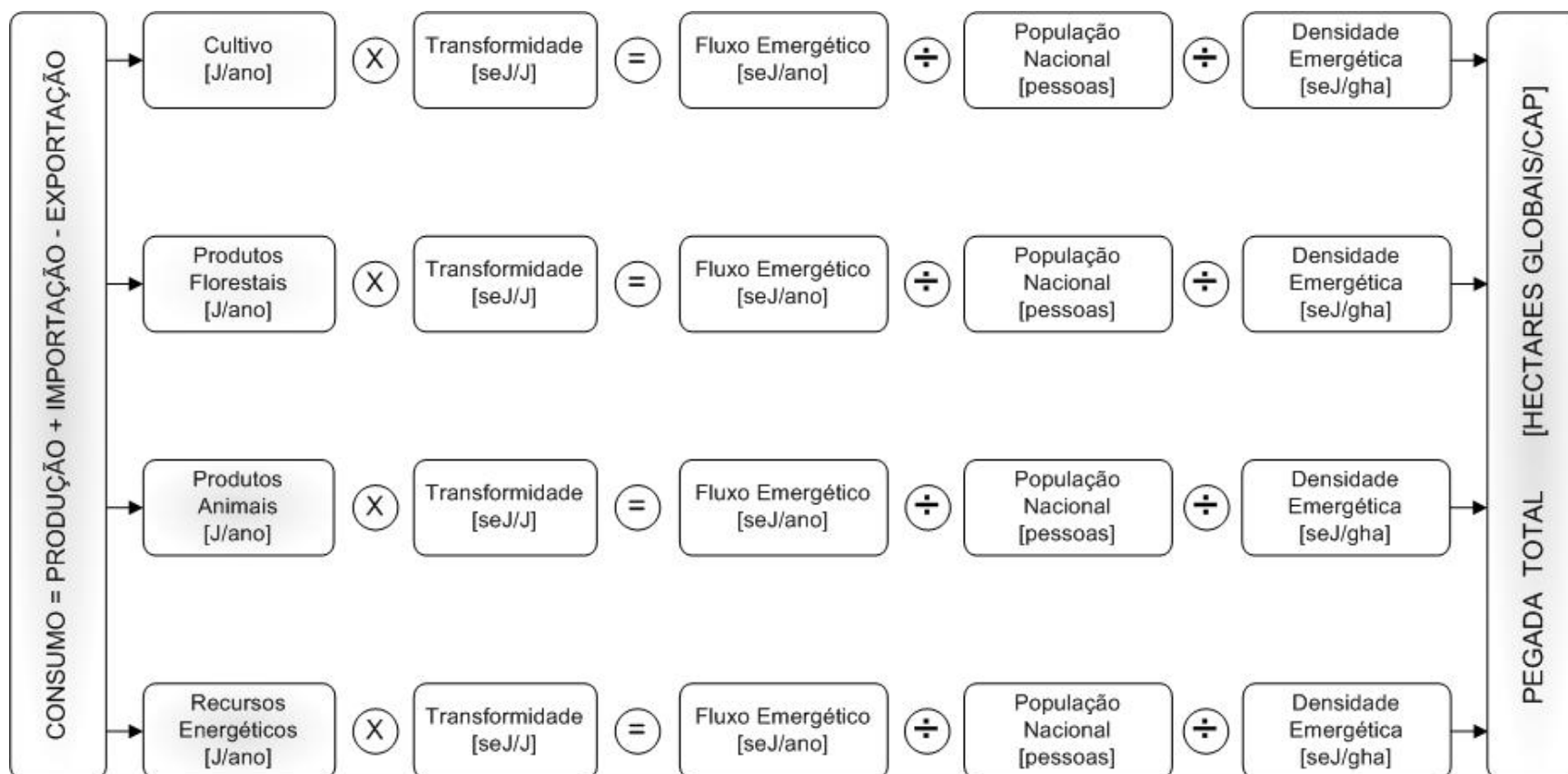


Figura 27: Estrutura de Cálculo da Pegada segundo metodologia proposta nesse trabalho

6.2.5. QUINTA ETAPA: ANÁLISE DAS RELAÇÕES BIOCAPACIDADE-PEGADA

O passo final da metodologia da Pegada Ecológica, seja qual for sua versão, é a análise das relações entre os valores encontrados para a biocapacidade e para a pegada. Segundo Monfreda et al. (2004), as áreas equivalentes à demanda humana e à oferta da natureza podem ser diretamente comparadas. Assim, os componentes e as categorias são comensuráveis e facilmente comparáveis.

A comparação dos valores pode ser feita de diversas formas, inclusive por categorias que foram avaliadas dentro dos dois conceitos. A forma mais comum de comparação é chamada de *Saldo Ecológico*. Como proposto por Monfreda et al. (2004), essa medida pode servir como um indicador da sustentabilidade do país. O valor do saldo ecológico é obtido pela subtração da biocapacidade pela pegada, ou seja:

$$\text{Saldo Ecológico [gha/cap]} = \text{Biocapacidade [gha/cap]} - \text{Pegada [gha/cap]} \quad (\text{equação 34})$$

Como já explicado anteriormente na revisão sobre metodologia convencional de Pegada Ecológica, um saldo positivo é um excesso ou reserva ecológica e o saldo negativo é um déficit ecológico.

Uma segunda maneira de comparar biocapacidade e pegada sugerida por Siche (2007) é o chamado *Fator Capacidade de Suporte*. Segundo ele, essa é uma análise muito melhor do que o saldo ecológico, pois as metodologias podem apresentar grandes diferenças em relação aos valores absolutos obtidos. Porém o fator capacidade suporte é obtido pela razão entre biocapacidade e pegada, o que permite uma boa comparação entre os resultados obtidos pelas diferentes metodologias. Essa fração significa o quanto um território pode suportar sua população levando em conta o padrão de vida atual.

$$\text{Fator Capacidade de Suporte} = \frac{\text{Biocapacidade [gha/cap]}}{\text{Pegada [gha/cap]}} \quad (\text{equação 35})$$

- Biocapacidade / Pegada > 1: significa que o sistema é sustentável;
- Biocapacidade / Pegada < 1: significa que o sistema é insustentável;
- Biocapacidade / Pegada = 1: significa que o sistema está no limite da capacidade de suporte.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as estimativas da biocapacidade e da pegada foram feitas as seguintes considerações:

- População do Brasil = 180.000.000 pessoas (estimativa baseada no IBGE (2004));
- População Mundial = 6.200.000.000 pessoas (estimativa baseada na ONU (2004));
- Densidade Emergética Global = $3,10E+14$ seJ/ha.ano ou $3,10E+10$ seJ/m².ano (Zhao et al. (2005));

7.1. DIAGRAMA

A primeira etapa a ser realizada foi a construção do diagrama sistêmico do Brasil. O país foi dividido basicamente em duas áreas principais: área natural e área antrópica. Além disso, foram incluídas no diagrama a área referente aos outros países que mantêm relações de importação-exportação com o Brasil e os espaços mundiais não ocupados pelo homem.

Do lado esquerdo do diagrama destacada na cor verde encontra-se a área natural que inclui:

- a) Ecossistemas Naturais Preservados:
 - Zonas Costeiras,
 - Amazônia,
 - Mata Atlântica,
 - Cerrado, Pantanal,
 - Semi-Árido;
 - Pampas.
- b) Atividade Produtiva (Cultivos, Pastagens e Floresta):
 - Soja;
 - Cana-de-açúcar;

- Cereais e Grãos;
- Feijão;
- Algodão;
- Vegetais;
- Eucalipto;
- Frutas;
- Pastagem.

Apesar de não estarem incluídos na área natural no diagrama, outros dois tipos de espaço são considerados para as estimativas da biocapacidade. Considera-se que neles há entradas renováveis e geração de serviços úteis ao homem e à natureza. Nas estimativas de biocapacidade, levam-se em conta somente as fontes renováveis que entram nesses espaços:

c) Área Humana:

- Urbana.

d) Espaços Não Ocupados pelo Homem no Planeta:

- Áreas Congeladas;
- Oceanos;
- Desertos;

Do lado esquerdo do diagrama sistêmico (figura 28a), estão representadas as fontes renováveis que ingressam no país. São esses fluxos de energia que serão utilizados como ponto de partida para as estimativas de biocapacidade de cada um dos tipos de área considerados.

A área natural é, portanto, o espaço com produção de biomassa renovável e geração de serviços ecossistêmicos. Áreas agrícolas como as de produção de soja ou cana-de-açúcar recebem muitos insumos não-renováveis, além dos recursos renováveis como sol, chuva, vento, etc. Consideramos, então, que há a formação de dois estoques nesse caso: um renovável e outro não-renovável. A fração renovável dos recursos é a que será utilizada nas estimativas de biocapacidade.

As linhas verdes do diagrama (figura 28a) representam os fluxos de energia renovável dentro do sistema, sejam eles produtos ou mesmo serviços ecossistêmicos.

Na parte superior do diagrama aparece a zona dos espaços não ocupados pelas atividades humanas: oceanos, áreas congeladas e desertos. Essa área recebe fluxos renováveis de energia como sol, vento, chuva, calor interno da Terra e ondas. Apesar de reconhecermos a importância desses espaços para o funcionamento dos ecossistemas globais, ainda não há uma clara definição de como eles atuam e de que forma são fornecidos esses serviços ecossistêmicos.

Dentre os serviços ecossistêmicos fornecidos por essa área podemos destacar: manutenção de biodiversidade, regulação climática, reflexão da luz solar, assimilação de gases de efeito estufa, formação de massas de ar, etc.

Do lado direito do diagrama encontra-se a área antrópica (cor vermelha) que inclui:

a) Cultivos:

- Soja;
- Açúcar e Alcool;
- Cereais e Grãos;
- Feijão;
- Algodão;
- Frutas e Vegetais.

b) Floresta (Produtos Florestais):

- Madeira.

c) Produtos Animais:

- Carne;
- Leite;
- Peixe.

d) Recursos Energéticos:

- Carvão;

- Petróleo;
- Gás Natural;
- Hidroeletricidade.

A área antrópica representa produção, consumo, importação e exportação de produtos e recursos não-renováveis. Como destacado anteriormente, os espaços referentes à criação de animais, ao cultivo, à floresta e à área urbana apresentam tanto produção renovável, como não-renovável.

As linhas vermelhas do diagrama (figura 28a) representam os fluxos de produtos e energia consumidos, importados e exportados pela economia brasileira. Apesar de estarem presentes no diagrama sistêmico, as externalidades negativas e os resíduos gerados não foram considerados para as estimativas de pegada nesse trabalho.

Assim como na metodologia emergética, os recursos não-renováveis são representados fora dos limites dos sistemas considerados. Apesar disso, as linhas que saem desses estoques simbolizam o consumo interno, importação e exportação dos recursos.

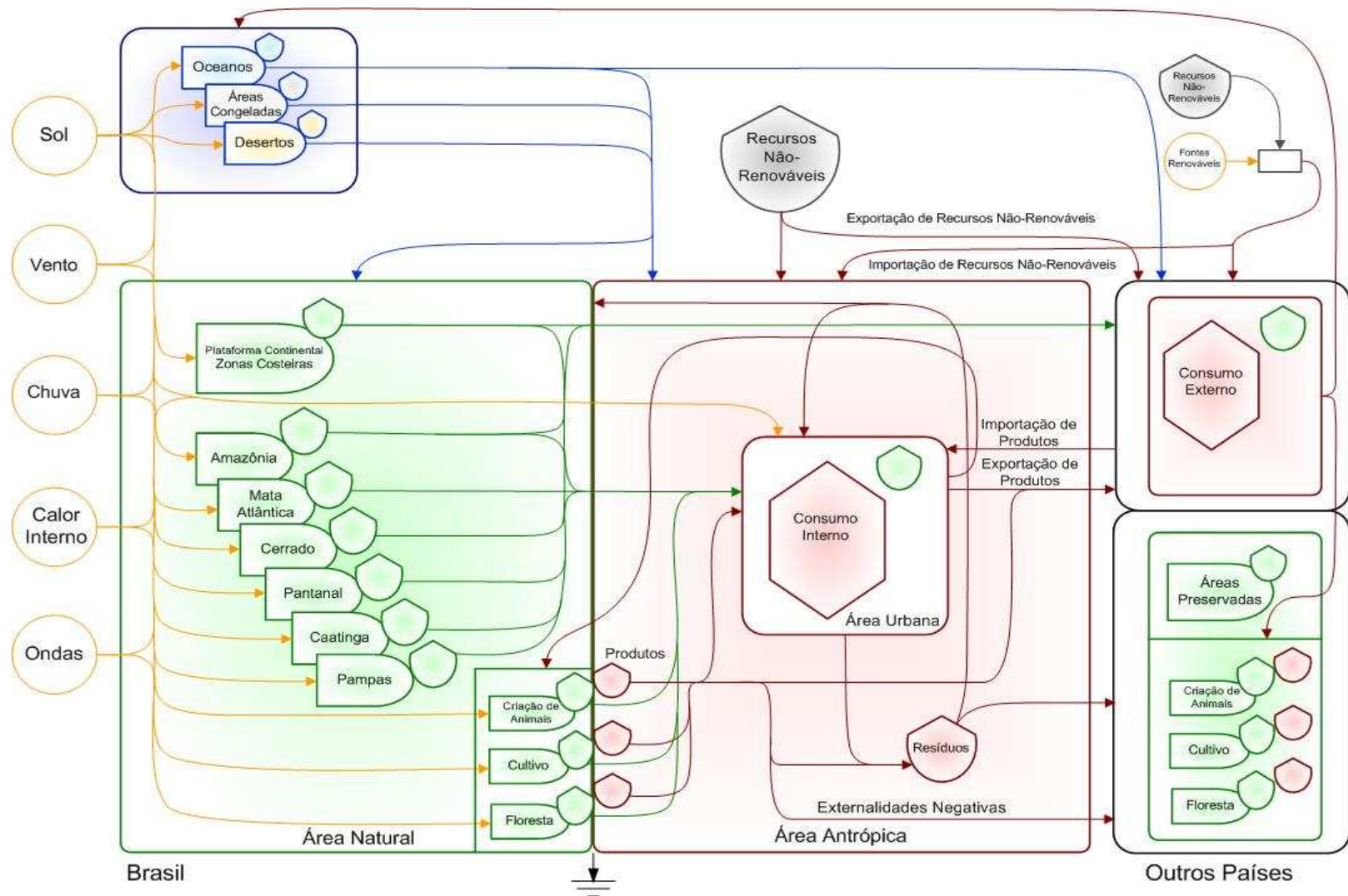


Figura 28a: Diagrama Sistêmico do Brasil

7.2. BIOCAPACIDADE

A biocapacidade foi calculada como função das entradas renováveis de cada um dos tipos de áreas consideradas a seguir. Segundo a metodologia proposta nesse trabalho, dever-se-ia estimar a biocapacidade pelas fontes renováveis que ingressam nos sistemas: sol, vento, chuva e energia interna da Terra, selecionando o maior fluxo emergético renovável como a energia renovável total da área considerada. Porém não haveria tempo hábil de se fazer todos os cálculos para cada um dos tipos de espaços considerados como parte da “Área Natural”. Para prosseguir, selecionamos apenas uma fonte para cada tipo de espaço. Na maioria absoluta de artigos e teses publicados que envolvem o cálculo emergético (Cavalett, 2004; Agostinho, 2005; Souza, 2006), o potencial químico da chuva aparece como a maior fonte de energia renovável.

Para se estimar a energia renovável que ingressa por ano em cada um desses ecossistemas utilizou-se a equação 21:

Potencial Químico da Chuva [J/ano] = (Área terrestre do Espaço + Área da Plataforma Continental) [m²] x (Pluviosidade) [m/ano] x (Densidade da Água) [kg/m³] x (Potencial Químico da Água) [J/kg]

7.2.1. ECOSSISTEMAS NATURAIS PRESERVADOS

Um ecossistema é um conjunto de regiões com características naturais semelhantes. Segundo o IBGE (2004), o Brasil possui 6 ecossistemas ou biomas diferentes: Floresta Amazônica, Caatinga, Pantanal, Cerrado, Mata Atlântica, além das Zonas Costeiras. Devido à grande diversidade entre os ecossistemas, a metodologia propõe a divisão desse item dos cálculos da biocapacidade, a fim de realçar essas diferenças obtendo resultados mais condizentes com a realidade ecológica brasileira.

É importante ressaltar que parte da cobertura vegetal original brasileira já foi destruída ou sofreu algum processo de mudança de uso do solo. Diante desse quadro, consideramos os dados do MMA (2007) acerca das áreas preservadas dos biomas brasileiros.

Em 2007, um estudo detalhado do Ministério do Meio Ambiente revelou a situação de todos os biomas do País (tabela 14). Os Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros foram apresentados pelo Ministério do Meio Ambiente durante a abertura da 12ª Reunião Extraordinária da Conabio - Comissão Nacional de Biodiversidade, em Brasília. O estudo revelou que a cobertura vegetal nativa dos biomas Amazônia, Cerrado, Pampa, Pantanal e Caatinga apresentam áreas com percentuais acima de 40% em relação às suas coberturas originais. O Pantanal é o bioma que detém o melhor resultado, com 88,70% de cobertura vegetal nativa intacta. Depois aparece a Amazônia (85,00%), seguida da Caatinga (62,69%), do Cerrado (61,10%) e do Pampa, com 41,30%. O último lugar da lista pertence à Mata Atlântica, com 27,44%.

Tabela 15: Cobertura vegetal nativa intacta dos biomas brasileiros

Bioma	Cobertura Vegetal Nativa Intacta (em %)
Amazônia	85,00
Mata Atlântica	27,44
Cerrado	61,10
Pantanal	88,70
Caatinga	62,69
Pampas	41,30

Fonte: MMA (2007)

7.2.1.1. FLORESTA AMAZÔNICA

A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical do planeta e possui características de vários ecossistemas: além da floresta úmida de terra firme, apresenta diferentes tipos de matas, campos abertos e cerrado. Abriga uma infinidade de espécies vegetais e animais. A Amazônia brasileira tem 1.200 espécies conhecidas de aves. Em um raio de 150 km de Manaus é possível encontrar 800 delas, mais do que nos Estados Unidos e Canadá juntos (que têm 700). O mesmo com os peixes: o número de espécies descritas na Amazônia (mais de 2 mil) é dez vezes maior que o de toda a Europa – apenas 200. Só no Lago Catalão, entre os Rios Negro e Solimões, em frente a Manaus, há 300 espécies conhecidas, segundo os especialistas do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa).

A Amazônia abrange uma área de aproximadamente 4.196.943 km². Apesar de sua dimensão, da riqueza de espécies que abriga e da diversidade de habitats que oferece, há grandes lacunas no conhecimento sobre sua flora, fauna e processos ecológicos. O mapeamento de sua cobertura vegetal (MMA, 2007) foi feito a partir de 198 imagens Landsat, captadas de 2001 a 2004. A partir de 261 cartas, na escala de 1:250.000, foi possível mapear as classes de vegetação (tipos de fisionomia, distribuição espacial) e classes de uso (vegetação secundária, pasto, cultura). O trabalho revelou uma área de cobertura vegetal nativa de 85%; destes, 80,76% compostos por florestas, 2,5% por água e 3% por vegetação secundária, indicando uma área antropizada total de 9,5%. No Brasil, a Floresta Amazônica abrange os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e ainda uma pequena área do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso.

Os resultados obtidos para a biocapacidade da Floresta Amazônica foram os seguintes:

Tabela 16: Resultados da Biocapacidade para a Floresta Amazônica

Ítem	Valor	Unidade
Área Total	4,20E+12	m ²
Área Preservada	3,57E+12	m ²
Pluviosidade	3,00E+00	m/ano
Potencial Químico da Chuva	5,29E+19	J/ano
Energia do Potencial Químico da Chuva	1,62E+24	seJ/ano
Energia por pessoa	8,99E+15	seJ/cap
Biocapacidade por pessoa	28,99	gha/cap

7.2.1.2. MATA ATLÂNTICA

A Mata Atlântica é considerada o mais ameaçado dos biomas. Nela se concentram 70% da população brasileira, distribuída em 15 estados. Apesar da devastação, a Mata Atlântica ainda conserva uma parcela significativa da diversidade biológica do país, com altíssimos níveis de endemismo. Abriga inúmeras populações tradicionais e garante o abastecimento de água para mais de 120 milhões de pessoas.

A inovação do mapeamento (MMA, 2007) está na identificação dos remanescentes de formações não florestais, além das áreas antrópicas, em toda a área de abrangência do bioma. O estudo Ministério do Meio Ambiente apontou a presença de 27,44% de remanescentes (22,44% florestais e 5% não-florestais). Esse total agrega áreas acima de aproximadamente 15 hectares, incluindo vegetação original e secundária em estágio mais avançado. Os resultados obtidos para a biocapacidade da Mata Atlântica foram os seguintes:

Tabela 17: Resultados da Biocapacidade para a Mata Atlântica

Ítem	Valor	Unidade
Área Total	1,11E+12	m ²
Área Preservada	3,05E+11	m ²
Pluviosidade	2,50E+00	m/ano
Potencial Químico da Chuva	3,76E+18	J/ano
Energia do Potencial Químico da Chuva	1,15E+23	seJ/ano
Energia por pessoa	6,40E+14	seJ/cap
Biocapacidade por pessoa	2,06	gha/cap

7.2.1.3. CERRADO

O Cerrado se estende pela Bahia, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo, Tocantins e Distrito Federal. Ele é considerado o segundo bioma brasileiro mais rico em biodiversidade. O mapeamento do Ministério do Meio Ambiente de 2007 revelou que a porcentagem da cobertura vegetal do Cerrado é de 61,1%. Esse percentual é maior do que outros levantamentos feitos, como o da ONG - Conservação Internacional, que em 2004 indicava 55% de área intacta. Uma

das principais razões dessa diferença está na resolução espacial dos dados de sensoriamento remoto. Os resultados da Conservação Internacional se baseiam em imagens de satélite com uma resolução espacial de 1 km, menos precisa do que a resolução do satélite Landsat, usada no mapeamento, de 30 metros.

Os resultados obtidos para a biocapacidade do Cerrado foram os seguintes:

Tabela 18: Resultados da Biocapacidade para o Cerrado

Ítem	Valor	Unidade
Área Total	2,03E+12	m ²
Área Preservada	1,24E+12	m ²
Pluviosidade	2,00E+00	m/ano
Potencial Químico da Chuva	1,23E+19	J/ano
Energia do Potencial Químico da Chuva	3,75E+23	seJ/ano
Energia por pessoa	2,08E+15	seJ/cap
Biocapacidade por pessoa	6,72	gha/cap

7.2.1.4. PANTANAL

O Pantanal se situa na região Centro-Oeste e está inserido na bacia do Rio Paraguai. As paisagens pantaneiras formam um grande mosaico que, mesmo ocupado há mais de 250 anos, abriga grande diversidade de espécies de plantas e animais adaptados à dinâmica do clima e aos pulsos de inundação da região. Foram compostas para o bioma 17 imagens de satélite da série Landsat, do ano de 2002, e 20 cartas topográficas na escala de 1:250.000. Verificou-se que 88,7% da cobertura vegetal nativa do bioma encontra-se preservada, enquanto 11,7% é área de uso antrópico. As áreas mais preservadas estão no Mato Grosso e no Mato Grosso do Sul, 85,3% e 91% respectivamente.

Os resultados obtidos para a biocapacidade do Pantanal foram os seguintes:

Tabela 19: Resultados da Biocapacidade para o Pantanal

Ítem	Valor	Unidade
Área Total	1,50E+11	m ²
Área Preservada	1,33E+11	m ²
Pluviosidade	1,25E+00	m/ano
Potencial Químico da Chuva	8,24E+17	J/ano
Energia do Potencial Químico da Chuva	2,52E+22	seJ/ano
Energia por pessoa	1,40E+14	seJ/cap
Biocapacidade por pessoa	0,45	gha/cap

7.2.1.5. CAATINGA

A Caatinga se estende por quase todos os estados do Nordeste e por parte de Minas Gerais. Estima-se que pelo menos 932 espécies foram registradas na região, sendo 380 endêmicas (típicas da região). A área do bioma compreende 844.453 Km², cobrindo 9,92% do território nacional. Dentre os biomas brasileiros, é o menos conhecido cientificamente. No estudo divulgado pelo Ministério do Meio Ambiente, foram processadas 54 cenas do satélite Landsat, resultando na produção de 48 cartas. Os mapas do bioma estão na escala de 1:250.000. O estudo revelou que a área preservada compreende o equivalente a 62,69% da cobertura original.

Os resultados obtidos para a biocapacidade da Caatinga foram os seguintes:

Tabela 20: Resultados da Biocapacidade para a Caatinga

Ítem	Valor	Unidade
Área Total	8,44E+11	m ²
Área Preservada	5,29E+11	m ²
Pluviosidade	9,00E-01	m/ano
Potencial Químico da Chuva	2,35E+18	J/ano
Energia do Potencial Químico da Chuva	7,20E+22	seJ/ano
Energia por pessoa	4,00E+14	seJ/cap
Biocapacidade por pessoa	1,29	gha/cap

7.2.1.6. PAMPAS

O bioma compreende os campos da metade-sul e das Missões do Rio Grande do Sul. No mapeamento feito pelo MMA (2007), foram usadas 22 imagens de satélite Landsat 5 TM e 7 ETM+, ano base 2002. Foram confeccionadas 23 cartas-imagem na escala 1:250.000. O mapeamento revelou que o bioma apresenta um total de 41,00% de cobertura vegetal nativa. Desse total, 23,03% correspondem a formações campestres, 5,19% a formações florestais e 12,91% a formações de transição. Das áreas consideradas não remanescentes, 58,68%, há 9,99% de corpos d'água naturais ou artificiais.

Os resultados obtidos para a biocapacidade dos Pampas foram os seguintes:

Tabela 21: Resultados da Biocapacidade para os Pampas

Ítem	Valor	Unidade
Área Total	1,76E+11	m ²
Área Preservada	7,24E+10	m ²
Pluviosidade	1,25E+00	m/ano
Potencial Químico da Chuva	4,47E+17	J/ano
Energia do Potencial Químico da Chuva	1,37E+22	seJ/ano
Energia por pessoa	7,60E+13	seJ/cap
Biocapacidade por pessoa	0,25	gha/cap

7.2.1.7. ZONAS COSTEIRAS

As zonas costeiras correspondem à zona de transição entre o domínio continental e o domínio marinho. É uma faixa complexa, dinâmica, mutável e sujeita a vários processos geológicos. A Zona Costeira brasileira é uma unidade territorial, definida pela legislação para efeitos de gestão ambiental. Ela se estende por 7.300 km, distância que chega a 8.500 km, quando se considera o recorte litorâneo. Vai do norte equatorial ao sul temperado, passando por 17 estados e mais de 400 municípios.

Os resultados obtidos para a biocapacidade das Zonas Costeiras foram os seguintes:

Tabela 22: Resultados da Biocapacidade para as Zonas Costeiras

Ítem	Valor	Unidade
Área Total	6,70E+11	m ²
Pluviosidade	3,00E+00	m/ano
Potencial Químico da Chuva	9,93E+18	J/ano
Energia do Potencial Químico da Chuva	3,04E+23	seJ/ano
Energia por pessoa	1,69E+15	seJ/cap
Biocapacidade por pessoa	5,45	gha/cap

7.2.2. CULTIVO, PASTAGEM E FLORESTA

As áreas de cultivo, pastagem e floresta são responsáveis pela produção dos produtos agrícolas, agropecuários e florestais. São reconhecidamente setores com grande emprego de recursos não-renováveis da economia brasileira, como defensivos agrícolas e combustíveis fósseis, além de gerarem grandes impactos negativos na natureza, como queimadas e erosão do solo. Porém, como qualquer outro tipo de área, elas recebem energia renovável através do sol, chuva, vento, etc. Dessa forma, a biocapacidade é calculada em função dessas entradas renováveis. Como já citado anteriormente, nesse trabalho a biocapacidade foi estimada somente em função da energia potencial química da chuva, admitindo-se que essa energia gera o maior fluxo emergético renovável (tabela 23).

Os resultados encontrados foram os seguintes:

Tabela 23: Resultados da Biocapacidade para as áreas de Cultivo, Pastagem e Floresta

Tipo de Área	Área Total (m²)	Pluviosidade (m/ano)	Potencial Químico da Chuva (J/ano)	Energia por pessoa (seJ/cap)	Biocapacidade por pessoa (gha/cap)
Soja	2,07E+11	2,00E+00	2,04E+18	3,47E+14	1,12
Cana-de-açúcar	7,04E+10	2,50E+00	8,69E+17	1,48E+14	0,48
Eucalipto	3,50E+10	2,50E+00	4,32E+17	7,35E+13	0,24
Frutas	4,04E+08	2,50E+00	4,99E+15	8,48E+11	0,00
Cereais e Grãos	1,87E+11	2,50E+00	2,30E+18	3,92E+14	1,26
Feijão	4,00E+10	2,50E+00	4,94E+17	8,40E+13	0,27
Algodão	1,30E+10	2,00E+00	1,28E+17	2,18E+13	0,07
Vegetais	8,07E+09	2,50E+00	9,97E+16	1,69E+13	0,05
Pastagem	1,73E+12	2,50E+00	2,14E+19	3,63E+15	11,72
TOTAL					15,21

7.2.3. ÁREA HUMANA

A área humana corresponde às áreas de cidades. Apesar de serem espaços de ocupação antrópica, há entradas renováveis como em todas as outras áreas. Como a maior parte da concentração urbana se localiza na região Sudeste do país. Consideramos a pluviosidade dessa área como sendo a mesma da Mata Atlântica, bioma predominante nos estados da região.

Tabela 24: Resultados da Biocapacidade para a Área Urbana

Tipo de Área	Área Total (m²)	Pluviosidade (m/ano)	Potencial Químico da Chuva (J/ano)	Energia por pessoa (seJ/cap)	Biocapacidade por pessoa (gha/cap)
Urbana	2,20E+10	2,50E+00	2,72E+17	4,62E+13	0,15

7.2.4. ESPAÇOS NÃO OCUPADOS PELO HOMEM

Uma das propostas da metodologia apresentada nesse trabalho foi a de incluir espaços considerados de baixa produtividade e excluídos do cálculo convencional da Pegada Ecológica. As áreas a serem incluídas serão: áreas congeladas, desertos e oceanos.

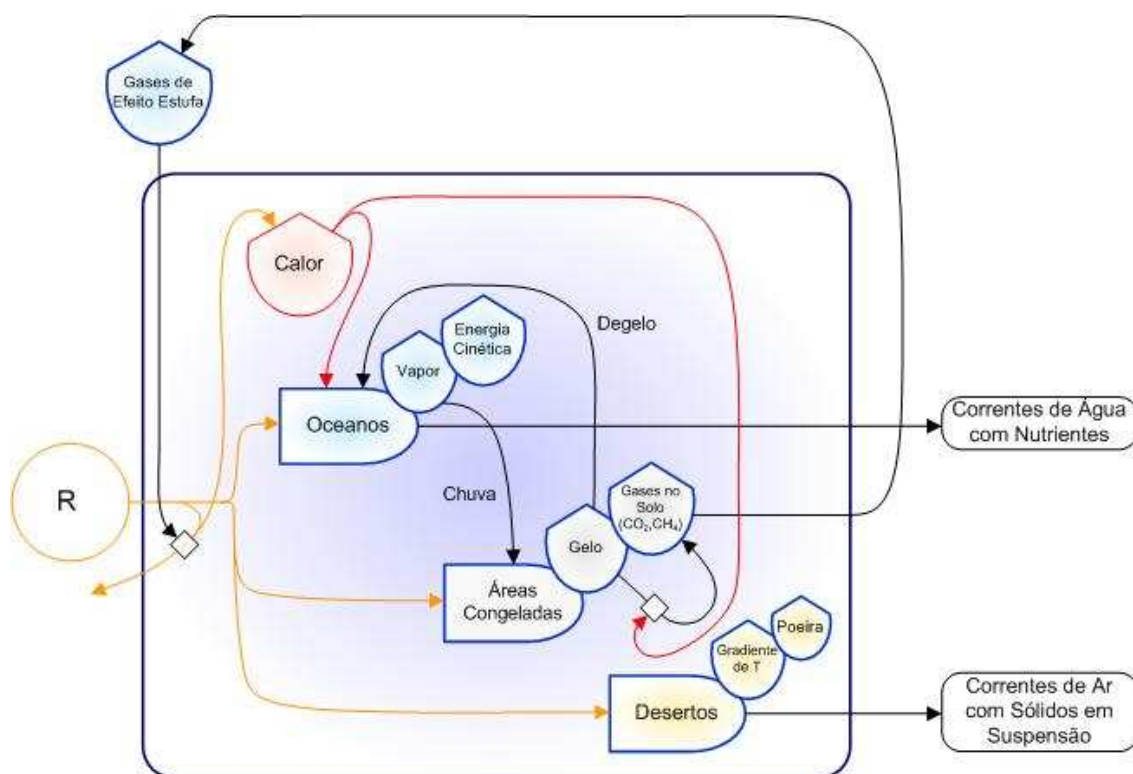


Figura 28b: Diagrama Sistêmico dos Espaços não ocupados pelo Homem no Planeta

As áreas congeladas consideradas são as do Ártico e Antártida. Apesar de excluídas dos cálculos da metodologia convencional, grande parte dessas áreas apresenta vegetação característica conhecida como tundra. São regiões com fontes minerais e energéticas como petróleo, gás natural e carvão, e habitadas por mamíferos marinhos, peixes, aves, etc. Além disso, os solos congelados armazenam gases como CO₂ e CH₄.

Os oceanos representam o principal componente da hidrosfera. Aproximadamente 71% de toda a superfície terrestre (394.000.000 km²) é coberta pelos oceanos. São de essencial importância para o transporte e pesca comerciais. Estão relacionados com a regulação climática global, absorção de CO₂ e formação de correntes marítimas. Essas correntes se devem à rotação do planeta, ventos, diferenças de temperatura e salinidade, e força gravitacional lunar. O degelo natural das áreas congeladas contribui de forma significativa para a formação dessas correntes marítimas. A água doce gelada entra em contato com a água salgada e aquecida do mar, gerando gradientes de temperatura e salinidade que se transformam em energia cinética impulsionando o funcionamento das correntes. Portanto se considerarmos um cenário com aumento dos gases de efeito de

estufa, poderá haver também um aumento do estoque de calor no planeta. Esse calor pode levar a mudanças no degelo dos pólos, fazendo com que os gases retidos no solo sejam liberados contribuindo para um maior acúmulo de calor. Além disso, esse degelo anormal pode alterar o funcionamento das correntes oceânicas, prejudicando a distribuição de calor aos continentes e nutrientes à fauna marinha.

Desertos são formas de paisagem ou regiões que recebem muito pouca precipitação, no máximo 350 mm de precipitação anual. Apesar de apresentarem uma NPP muito baixa, em torno de 11 gC/m²/ano segundo Amthor (1998), valor que parece ser desprezível se comparado com os 925 gC/m²/ano (Amthor, 1998) gerados por uma floresta tropical, os desertos apresentam funções importantes para o planeta como um todo. Estão relacionados com formação de massas de ar e arrasto de poeiras.

Tabela 25: Resultados da Biocapacidade para os Espaços Não Ocupados pelo Homem

Tipo de Área	Área Total (m²)	Pluviosidade (m/ano)	Potencial Químico da Chuva (J/ano)	Energia por pessoa (seJ/cap)	Biocapacidade por pessoa (gha/cap)
Áreas Congeladas	1,90E+13	6,00E-02	5,63E+18	2,78E+13	0,0897
Desertos	1,37E+13	3,50E-02	2,38E+18	1,17E+13	0,0378
Oceanos	3,94E+14	1,30E-01	2,53E+20	1,25E+15	4,0236
TOTAL					4,1511

Tabela 26: Resumo da Biocapacidade do Brasil por categorias

Item	Sistema	Área Considerada (m ²)	Energia Renovável (J/ano)	Energia Total (seJ/ano)	Energia por Pessoa (seJ/cap)	Biocapacidade (gha/cap)
1	<i>Ecossistemas Naturais Preservados</i>					45,21
1.1	Floresta Amazônica	3,57E+12	5,29E+19	1,62E+24	8,99E+15	28,99
1.2	Mata Atlântica	3,05E+11	3,76E+18	1,15E+23	6,40E+14	2,06
1.3	Cerrado	1,24E+12	1,23E+19	3,75E+23	2,08E+15	6,72
1.4	Pantanal	1,33E+11	8,24E+17	2,52E+22	1,40E+14	0,45
1.5	Pampas	7,29E+10	4,50E+17	1,37E+22	7,60E+13	0,25
1.6	Caatinga	5,29E+11	2,35E+18	7,20E+22	4,00E+14	1,29
1.7	Zona Costeira	6,70E+11	9,93E+18	3,04E+23	1,69E+15	5,45
2	<i>Cultivo, Pastagem e Floresta</i>					15,21
2.1	Soja	2,07E+11	2,04E+18	6,25E+22	3,47E+14	1,12
2.2	Cana-de-açúcar	7,04E+10	8,69E+17	2,66E+22	1,48E+14	0,48
2.3	Eucalipto	3,50E+10	4,32E+17	7,05E+22	3,92E+14	1,26
2.4	Frutas	4,04E+08	4,99E+15	1,51E+22	8,40E+13	0,27
2.5	Cereais e Grãos	1,87E+11	2,30E+18	3,93E+21	2,18E+13	0,07
2.6	Feijão	4,00E+10	4,94E+17	3,05E+21	1,69E+13	0,05
2.7	Algodão	1,30E+10	1,28E+17	1,32E+22	7,35E+13	0,24
2.8	Vegetais	8,07E+09	9,97E+16	1,53E+20	8,48E+11	0,00
2.9	Pastagem	1,73E+12	2,14E+19	6,54E+23	3,63E+15	11,72
3	<i>Área Humana</i>					0,15
3.1	Urbana	2,20E+10	2,72E+17	8,31E+21	4,62E+13	0,15
4	<i>Espaços Não Dominados pelo Homem</i>					4,14
4.1	Áreas Congeladas	1,90E+13	5,63E+18*	1,72E+23*	2,78E+13	0,09
4.2	Oceanos	3,94E+14	2,53E+20*	7,73E+24*	1,25E+15	4,02
4.3	Desertos	1,37E+13	2,38E+18*	7,27E+22*	1,17E+13	0,03
TOTAL						64,71

*Valores Globais

7.2.5. INTEGRIDADE DA COBERTURA VEGETAL NATIVA DOS BIOMAS BRASILEIROS

A vegetação é um dos componentes mais importantes da biota, na medida em que seus estados de conservação e de continuidade definem a existência ou não de habitats para as espécies, a manutenção de serviços ambientais ou mesmo o fornecimento de bens essenciais à sobrevivência de populações humanas.

A porcentagem de conservação da vegetação nativa de cada bioma é levada em consideração para as estimativas de biocapacidade realizadas nesse trabalho. Portanto, esses dados são de fundamental importância nos cálculos. A única grande iniciativa de mapeamento da vegetação em nível nacional (escala de trabalho 1:250.000, escala de publicação 1:1.000.000) havia sido executada entre os anos de 1970 e 1985 pelo Projeto RadamBrasil, com base em imagens de radar e em vasto trabalho de campo. Considerando-se os biomas individualmente, apenas a Amazônia e partes da Mata Atlântica tornaram-se objeto de programas permanentes de monitoramento da evolução da cobertura vegetal a partir do final da década de 1980, com base na interpretação de imagens do Satélite Landsat (MMA, 2007).

Segundo o MMA (2007), devido às transformações na ocupação do território brasileiro, ocorridas sobretudo em função da interiorização ao longo das últimas três décadas, os mapas de vegetação do RadamBrasil já não refletiam a realidade. A fim de preencher esta lacuna de conhecimento, bem como ampliar aquele disponível em relação aos biomas já monitorados para este parâmetro, o Ministério do Meio Ambiente - MMA, por meio do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira - PROBIO, lançou em 2004 dois editais para a seleção de subprojetos que realizassem o mapeamento da cobertura vegetal, adotando-se o recorte de biomas estabelecido no Mapa de Biomas do Brasil (IBGE, 2004).

Os seis subprojetos selecionados, um para cada bioma continental, tiveram os objetivos de mapear a cobertura vegetal, diagnosticar iniciativas de mapeamento e completar lacunas de conhecimento existentes em relação ao tema. O mapeamento da vegetação foi realizado com base em imagens Landsat, obtidas principalmente no ano 2002, as quais foram adquiridas e fornecidas aos subprojetos pelo MMA (MMA, 2007).

É importante ressaltar também que, por determinação do MMA, áreas em que houvesse predomínio de vegetação nativa, ainda que com algum grau de uso antrópico, deveriam ser contabilizadas e mapeadas no rol das tipologias de vegetação nativa. Por outro lado, áreas onde houve conversão em pastagens plantadas, cultivos agrícolas, reflorestamentos, mineração, urbanização e outros usos semelhantes em que a vegetação nativa deixasse de ser predominante, deveriam ser contabilizadas e discriminadas como áreas antrópicas. Outra premissa importante, determinada pelo MMA, é de que a vegetação secundária, em estágio avançado de desenvolvimento, deveria ser contabilizada e mapeada como vegetação nativa.

Diante dessas considerações e de algumas grandes discrepâncias entre os valores publicados em alguns estudos anteriores e os dados oficiais do MMA (2007), torna-se interessante uma avaliação da biocapacidade através de outros valores de preservação da vegetação nativa dos biomas brasileiros (tabela 27).

Tabela 27: Cobertura Vegetal Nativa Intacta dos Biomas Brasileiros

Bioma	Cobertura Vegetal Nativa Intacta (em %)	Referência
Amazônia	80,00	dos Santos et al. (2007)
Mata Atlântica	7,26	SOS Mata Atlântica e INPE (2008)
Cerrado	35,00	Mantovani e Pereira (1998)
Pantanal	88,73	Abdon et al. (2007)
Caatinga	21,16	Franca-Rocha et al. (2007)
Pampas	39,00	Buckup et al. (2007)

Os cálculos foram realizados utilizando-se a mesma metodologia aplicada nas estimativas de biocapacidade do item anterior. Foram modificados apenas os valores referentes às áreas preservadas de cada bioma. Os resultados de biocapacidade estão listados na tabela seguinte (tabela 28).

Tabela 28: Biocapacidade dos Ecossistemas Preservados

Bioma	Área Total (m²)	Área Preservada (m²)	Biocapacidade (gha/cap)
Amazônia	4,20E+12	3,36E+12	27,29
Mata Atlântica	1,11E+12	8,06E+10	0,55
Cerrado	2,03E+12	7,11E+11	3,85
Pantanal	1,50E+11	1,33E+11	0,45
Caatinga	8,44E+11	1,79E+11	0,44
Pampas	1,76E+11	6,88E+10	0,23
<i>TOTAL</i>	<i>8,51E+12</i>	<i>4,53E+12</i>	<i>38,25</i>

Comparando-se os valores de biocapacidade dos ecossistemas preservados das tabelas 26 e 28, percebe-se que a maior contribuição continua sendo do bioma amazônico com uma pequena diferença (28,99 gha/cap e 27,29 gha/cap). As estimativas de biocapacidade foram menores para todos os outros biomas, com exceção do Pantanal que ficou com o mesmo valor (0,45 gha/cap). Dessa forma, a biocapacidade total dos ecossistemas preservados utilizando-se dados de trabalhos científicos foi de 38,25 gha/cap. O valor obtido com os dados oficiais do Ministério do Meio Ambiente foi de 45,21 gha/cap, ou seja, uma diferença de 6,96 gha/cap ou cerca de 15%.

Considerando-se a estimativa de 38,25 gha/cap como biocapacidade de ecossistemas preservados, teria-se uma biocapacidade total para o Brasil de 57,75 gha/cap. Um valor cerca de 10% inferior ao calculado com os dados do Ministério do Meio Ambiente. Para fins de discussão dos resultados serão utilizados os valores oficiais (MMA, 2007), pois apesar da diferença encontrada em relação aos trabalhos científicos publicados, os dados foram estimados baseados em uma mesma metodologia e fazem parte de um mesmo estudo que abrange toda cobertura vegetal brasileira.

7.2.6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA BIOCAPACIDADE

De acordo com a tabela 25, a biocapacidade do Brasil é de 64,71 gha/pessoa, o que significa que os recursos renováveis fornecem cerca de 65 hectares globais de terra produtiva para cada brasileiro. É importante ressaltar que esses 65 hectares globais não são hectares reais, ou seja, representam um valor virtual de biocapacidade, que permite

uma comparação entre a oferta de recursos naturais renováveis e o impacto das atividades produtivas.

Após analisar os resultados apresentados na tabela 25 e na figura 29, fica claro que os ecossistemas naturais brasileiros são responsáveis por 69,8% de toda a biocapacidade do país. Além disso, verifica-se que a Floresta Amazônica contribui com mais de 47% dos recursos renováveis totais ou 64,1% da biocapacidade de todos os ecossistemas naturais brasileiros.

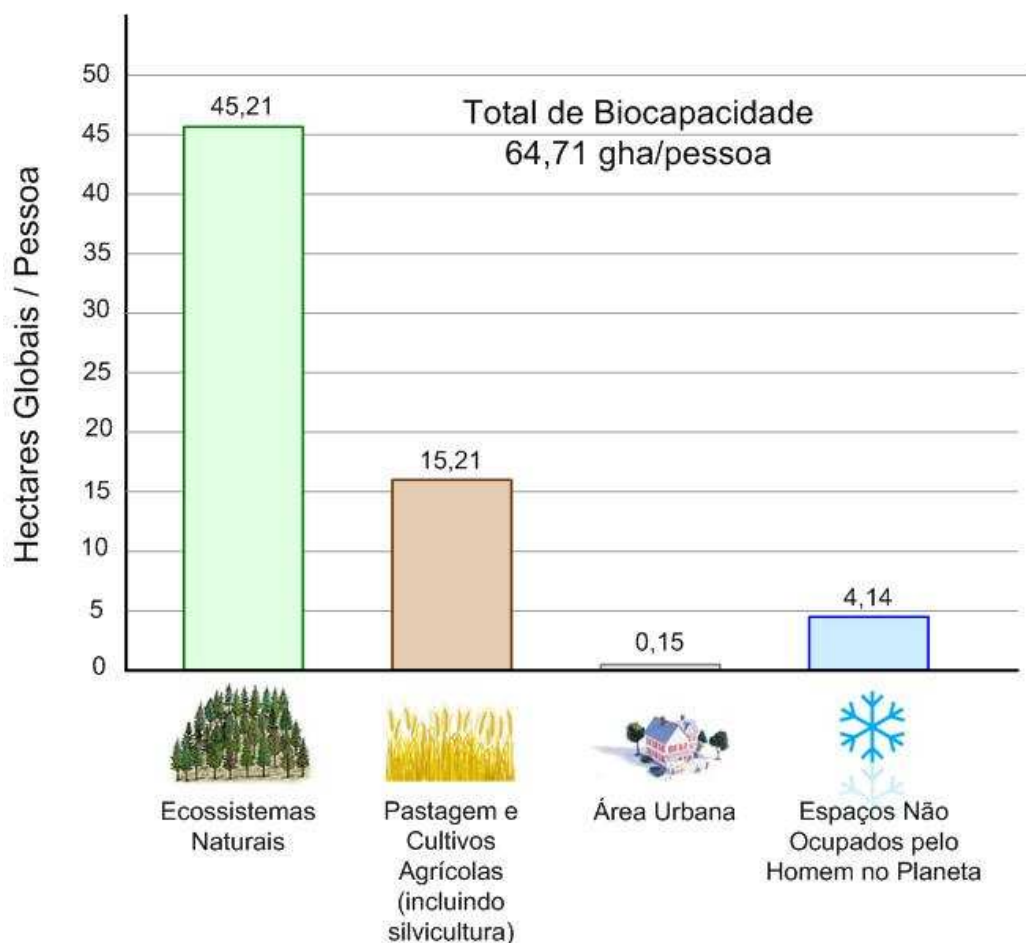


Figura 29: Biocapacidade do Brasil por Categorias

Como se pode ver na tabela 26, a contribuição total dos espaços não ocupados pelo homem é de 4,14 gha/pessoa (os oceanos fornecem 4,02 gha/pessoa). Esse valor é maior do que a biocapacidade da maioria dos ecossistemas preservados, perdendo apenas para a Amazônia e Cerrado, mostrando a importância de se considerar esses espaços nas estimativas.

Apesar disso, a importância dessas áreas que não pertencem exclusivamente a nenhum país é discutível, visto que ainda não é possível estimarmos a contribuição em termos de serviços ecossistêmicos prestados.

A biocapacidade das áreas de cultivos agrícolas e pastagem representam 15,21 gha/pessoa. As pastagens brasileiras (destinadas à pecuária de corte) ocupam mais de 170 milhões de hectares. Com isso contribuem com mais de 11 gha/pessoa nas estimativas de biocapacidade. A grande área ocupada pode ser explicada pelo sistema extensivo de produção utilizado no país, no qual os animais são criados em pasto, geralmente em propriedades com grandes áreas e com a utilização de processos pouco avançados.

As zonas urbanas obtiveram um valor baixo, 0,15 gha/pessoa, o que pode ser explicado pelo fato de serem áreas pequenas. Portanto, pela metodologia aplicada, esse fato contribui para um valor pequeno de entrada de recursos renováveis.

7.3. CÁLCULO DAS TRANSFORMIDADES PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DOS BIOMAS BRASILEIROS

Outro objetivo desse trabalho foi o de estimar valores de transformidade para a produção de biomassa dos biomas brasileiros.

Para efetuar essa estimativa, primeiramente é fundamental obter dados de NPP (Produtividade Primária Líquida) para os biomas brasileiros. A NPP é definida como a taxa líquida de carbono da atmosfera para as plantas por dia, semana ou ano. NPP é uma variável ecológica muito importante, não somente por medir a entrada de energia na biosfera e a assimilação terrestre de dióxido de carbono, mas também por indicar de forma significativa as condições da superfície terrestre e de uma série de processos ecológicos. A partir dos seus valores é possível estimar a biomassa presente em cada um dos biomas.

Assim como nas estimativas de biocapacidade, os fluxos de energia anuais foram estimados baseados na contribuição do potencial químico da chuva.

Os valores encontrados estão listados na tabela 29:

Tabela 29: Transformidades para Produção de Biomassa dos Biomas Brasileiros

Bioma	NPP* (kgC/m²/ano)	Biomassa (kg/m²/ano)	Energia da Biomassa (J/ano)	Energia (seJ/ano)	Transformidade (seJ/J)
Amazônia	0,93	1,69	1,01E+20	1,62E+24	1,60E+04
Mata Atlântica	0,93	1,69	8,62E+18	1,15E+23	1,33E+04
Cerrado	0,79	1,44	2,98E+19	3,75E+23	1,26E+04
Pantanal	1,18	2,15	4,79E+18	2,52E+22	5,26E+03
Pampas	0,35	0,64	7,71E+17	1,37E+22	1,77E+04
Caatinga	0,07	0,13	1,13E+18	7,20E+22	6,38E+04

**Todos os valores foram estimados a partir de Amthor (1998)*

- NPP para a Amazônia e a Mata Atlântica foi estimada a partir de dados de Floresta Tropical;
- NPP para o Cerrado foi estimada a partir de dados de Savana Tropical;
- NPP para o Pantanal foi estimada a partir de dados de Solos Alagados (Wetlands);
- NPP para os Pampas foi estimada a partir de dados de Campos Temperados (Temperate Grasslands);
- NPP para a Caatinga foi estimada a partir de dados de Semi-desertos.

Tabela 30: Transformidades para Produção de Biomassa de Ecossistemas

Sistema	Transformidade (seJ/J)
Bacia Hidrográfica de Floresta Temperada	4,70E+03
Savana Seca Temperada	1,05E+04
Floresta Subtropical de Madeira Dura Mista (Carvalho/Pinheiro)	5,50E+03
Ecossistema Subtropical de Pinheiros	1,07E+04
Ecossistema de Mangue Tropical	1,47E+04
Área Alagada Herbácea Subtropical	7,34E+04

Fonte: Brown e Bardi (2001)

Os valores de transformidade obtidos para a produção de biomassa dos biomas brasileiros (tabela 29) podem ser comparados com os listados no Folio #3 (Emergia de Ecossistemas) (tabela 30). Apesar de muitos dos valores calculados por Brown e Bard (2001) fazerem referência a ecossistemas subtropicais, observa-se que a ordem de grandeza desses é praticamente a mesma se comparada com a dos valores calculados para os ecossistemas brasileiros.

Ao compararmos vegetações semelhantes, percebe-se que o cerrado brasileiro e a savana temperada apresentam valores de transformidade de produção de biomassa muito próximos, $1,26\text{E}+04$ seJ/J e $1,05\text{E}+04$ seJ/J respectivamente.

Pode-se comparar também o Pantanal brasileiro com solos alagados subtropicais. Nesse caso, porém, os valores de transformidade diferem entre ambos apesar da vegetação semelhante. Esses valores são $5,26\text{E}+03$ seJ/J e $7,34\text{E}+04$ seJ/J respectivamente. O baixo valor encontrado para o Pantanal pode ser explicado pela baixa pluviosidade e pequena área ocupada pelo bioma.

7.4. PEGADA

A seguir (tabela 31), são apresentados os resultados para a pegada brasileira. Os dados de produção, exportação e importação foram obtidos de bando de dados oficiais do governo brasileiro que têm 2004 como o ano base.

Tabela 31: Resumo da Pegada do Brasil por Categorias (Dados de 2004)

Item	Sistema	Produção	Unidade	Energia da Produção (J/ano)	Energia da Produção (seJ/ano)	Pegada da Produção (gha/pessoa)	Pegada Exportada (gha/pessoa)	Pegada Importada (gha/pessoa)	Pegada Nacional (gha/pessoa)
1	<i>Cultivos</i>			8,38E+18	1,15E+24	20,645	1,509	0,344	19,480
1.1	Soja	5,84E+07	Mg/ano	7,82E+17	7,90E+22	1,416	0,943	0,000	0,473
1.2	Açúcar e Álcool	4,58E+08	Mg/ano	6,13E+18	4,90E+23	8,786	0,182	0,000	8,604
1.3	Cereais e Grãos	6,38E+07	Mg/ano	8,55E+17	9,76E+22	1,750	0,019	0,255	1,986
1.4	Feijão	3,30E+06	Mg/ano	4,42E+16	3,05E+22	0,547	0,001	0,017	0,563
1.5	Algodão	2,31E+06	Mg/ano	3,09E+16	5,88E+22	1,053	0,223	0,031	0,862
1.6	Frutas e Vegetais	4,00E+07	Mg/ano	5,36E+17	3,96E+23	7,093	0,142	0,041	6,992
2	<i>Produtos Florestais</i>			8,44E+17	2,95E+22	0,528	0,006	0,000	0,522
2.1	Madeira	1,40E+08	m³/ano	8,44E+17	2,95E+22	0,528	0,006	0,000	0,522
3	<i>Produtos Animais</i>			1,96E+17	7,58E+23	13,593	1,464	0,197	12,325
3.1	Carne bovina	1,72E+07	Mg/ano	7,93E+16	4,22E+23	7,569	1,423	0,015	6,160
3.2	Leite	2,45E+07	L/ano	1,13E+17	3,22E+23	5,774	0,032	0,180	5,922
3.3	Peixe	9,00E+05	Mg/ano	4,14E+15	1,39E+22	0,250	0,009	0,003	0,243
4	<i>Recursos Energéticos</i>			5,29E+18	4,73E+23	8,484	0,859	1,926	9,552
4.1	Carvão	5,19E+06	Mg/ano	1,51E+17	1,01E+22	0,180	0,000	0,000	0,180
4.2	Petróleo	5,48E+08	barris/ano	3,34E+18	2,98E+23	5,334	0,859	1,606	6,082
4.3	Gás Natural	1,70E+10	m³/ano	6,37E+17	3,75E+22	0,671	0,000	0,320	0,991
4.4	Hidroeleticidade	3,21E+11	kWh/ano	1,16E+18	1,28E+23	2,299	0,000	0,000	2,299
TOTAL				1,47E+19	2,41E+24	43,25	3,84	2,47	41,88

7.4.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA PEGADA

De acordo com a tabela 31, a pegada ecológica do Brasil é 41,88 gha/pessoa, o que significa que cada pessoa demanda uma área de 42 hectares de terra produtiva para suprir suas necessidades de alimentação, energia e produtos.

A figura 30 mostra que a maior contribuição para a pegada do país vem da categoria cultivo. Essa categoria responde por quase metade do consumo e é basicamente composta pela produção de commodities como soja, cana-de-açúcar e cereais, que são fornecidos sem diferenciação qualitativa no mercado internacional.

Com a atual tendência mundial de produção de biocombustíveis para substituição de uma parcela dos combustíveis fósseis e o próprio incentivo do governo brasileiro, a pegada dessa categoria tende a aumentar no futuro. Porém esse aumento pode afetar a produção de alimentos, não somente pela ocupação das áreas anteriormente destinadas ao cultivo de gêneros alimentícios, mas também pelo privilégio dado pelos produtores agrícolas aos biocombustíveis em face dos prováveis incentivos fiscais e econômicos.

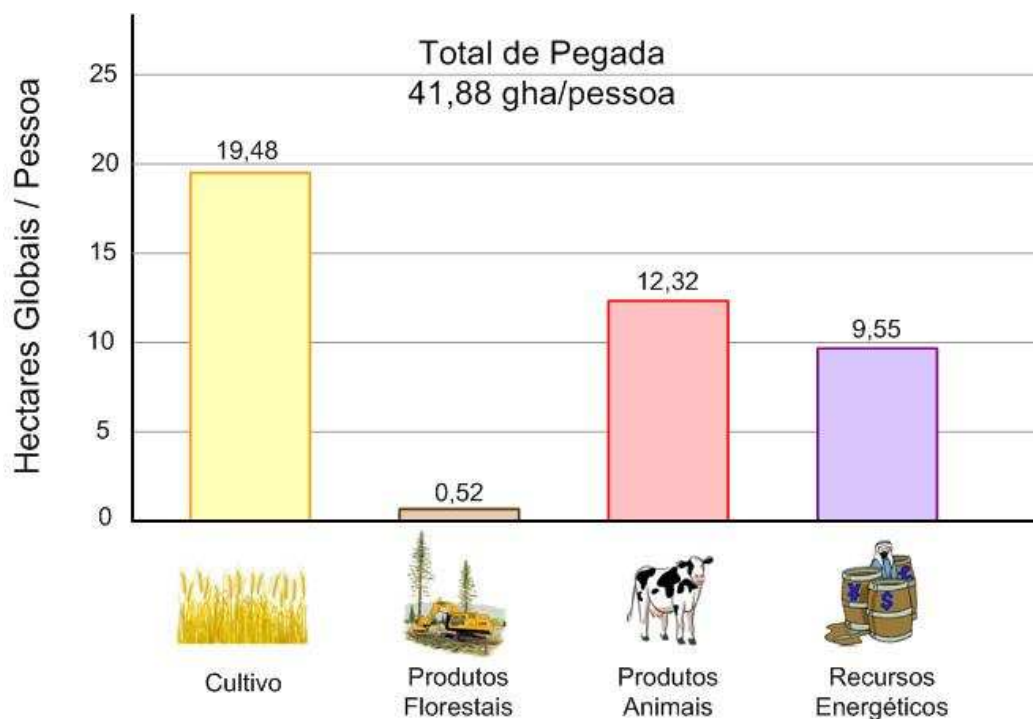


Figura 30: Pegada do Brasil por Categorias

Após analisar os resultados apresentados na tabela 31, percebe-se que a maior parte da pegada brasileira é composta por 5 produtos: açúcar e álcool (8,6 gha/pessoa), frutas e vegetais (6,9 gha/ pessoa), carne (6,2 gha/pessoa), leite (5,9 gha/pessoa) e petróleo (6,1 gha/pessoa).

Se considerarmos que metade do cultivo de cana-de-açúcar se destina à produção de etanol, podemos também transferir metade de sua pegada para a categoria de recursos energéticos. Dessa forma, a pegada referente a cultivos cairia para 15,18 gha/pessoa, e a pegada dos recursos energéticos subiria para 13,85 gha/pessoa, superando o consumo dos produtos animais.

Portanto, percebe-se como, cada vez mais, os recursos energéticos estão se tornando importantes nos balanços produtivos nacionais. Esse aumento está associado aos padrões de vida estabelecidos atualmente em todo o planeta. A solução proposta pelos governos e instituições que controlam as decisões é a de substituição de recursos, ou seja, procurar combustíveis alternativos para suprir esse modo de vida insustentável. A solução ideal seria reduzir o consumo e estabelecer um padrão sustentável em que todos pudessem suprir suas necessidades de forma ideal, porém esse é um pensamento utópico frente ao modelo de desenvolvimento adotado.

Os resultados obtidos ajudam a reforçar o perfil do país. A agricultura é concentrada em monoculturas que visam exportações e fornecimento de energia, especialmente a produção de cana-de-açúcar com 460 milhões de toneladas por ano. Além disso, mais de 50% das terras produtivas são destinadas à pecuária extensiva de corte, também visando à exportação do produto. Finalmente, como a maior parte dos países do mundo, o Brasil tem um grande consumo de petróleo, não só para manter sua frota de veículos, mas também seus meios de produção.

Através das análises das figuras 31 e 32, e da tabela 31 percebe-se que o Brasil é um país que exporta mais do que importa. As exportações totalizam 3,84 gha/pessoa ou $2,22 \times 10^{23}$ seJ/ano enquanto que as importações, 2,47 gha/pessoa ou $1,37 \times 10^{23}$ seJ/ano. Os principais produtos de exportação são a soja com 0,943 gha/pessoa , carne bovina com 1,423 gha/pessoa e o petróleo com 0,859 gha/pessoa. Em termos de importação,

pode-se destacar como principais produtos cereais e grãos com 0,255 gha/pessoa, petróleo com 1,606 gha/pessoa e gás natural com 0,320 gha/pessoa.

Portanto, se pensarmos em termos de área, considerando-se o comércio exterior, o Brasil exporta uma área equivalente a 691,2 milhões de hectares globais, enquanto as importações respondem por 444,6 milhões de hectares globais. Dessa forma, o país tem um déficit de 246,6 milhões de hectares globais, ou seja, toda essa área é utilizada para produzir produtos ou energia para outros países. Somente a soja é responsável pela exportação de mais de 13 milhões de hectares reais ou cerca de 170 milhões de hectares globais.

Considerando que a produtividade dos produtos importados é a mesma dos produtos nacionais é possível estimar-se a área importada em hectares reais. Os seguintes resultados foram obtidos para as áreas de produção, exportação e importação (tabela 32).

Tabela 32: Produção, Exportação e Importação em hectares

Área	Área Total (ha)	Área Exportada (ha)	Área Importada (ha)
Soja	2,07E+07	1,38E+07	0
Cana-de-açúcar	7,04E+06	1,28E+05	0
Cereais e Grãos	2,87E+07	1,76E+05	2,39E+06
Feijão	4,00E+06	3,76E+03	1,21E+05
Algodão	1,30E+06	3,36E+05	4,69E+04
Pecuária*	1,73E+08	4,00E+07	4,07E+05
TOTAL	2,35E+08	5,44E+07	2,96E+06

**Pecuária inclui os produtos leite e carne*

Analisando a tabela 31, podem-se identificar três principais áreas produtivas: soja, cereais e grãos, e pecuária. A área de pecuária corresponde a cerca de 50% de toda a área produtiva do país (173 milhões de hectares). A soja ocupa mais de milhões de hectares, enquanto cereais e grãos, mais de 28 milhões de hectares.

Através dos dados é possível obter as áreas equivalentes à importação e à exportação. Como já esperado, o país exporta 54,4 milhões de hectares e importa 29,6 milhões de hectares. Esses valores representam um déficit de 24,8 milhões de hectares.

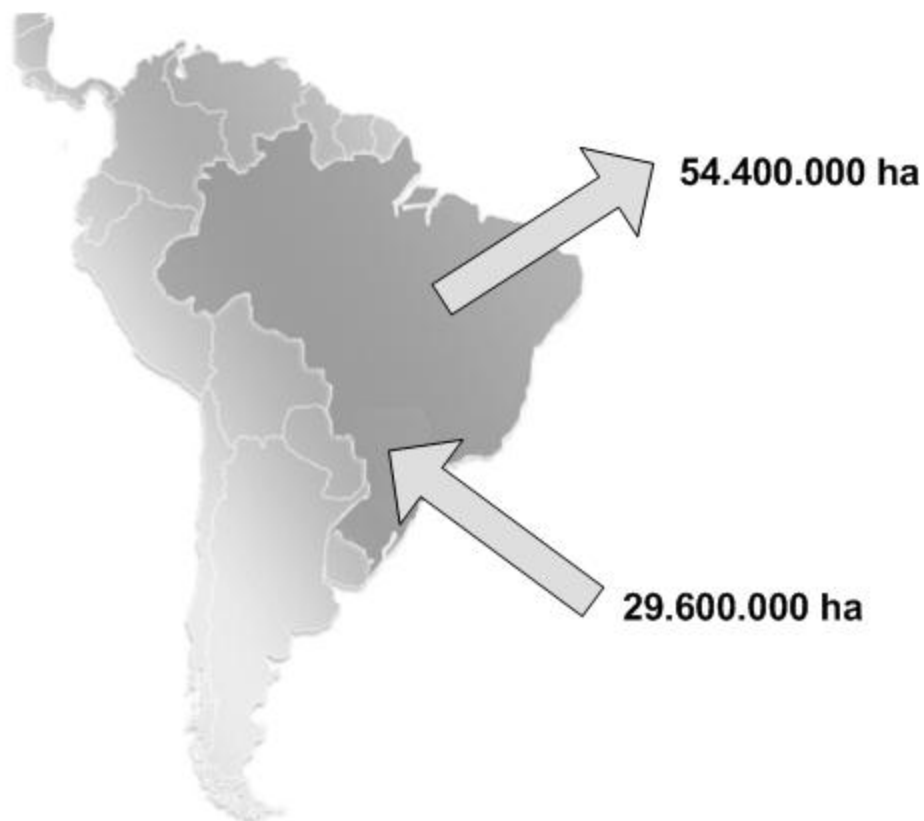


Figura 31: Exportações e Importações brasileiras em termos de área (hectares)

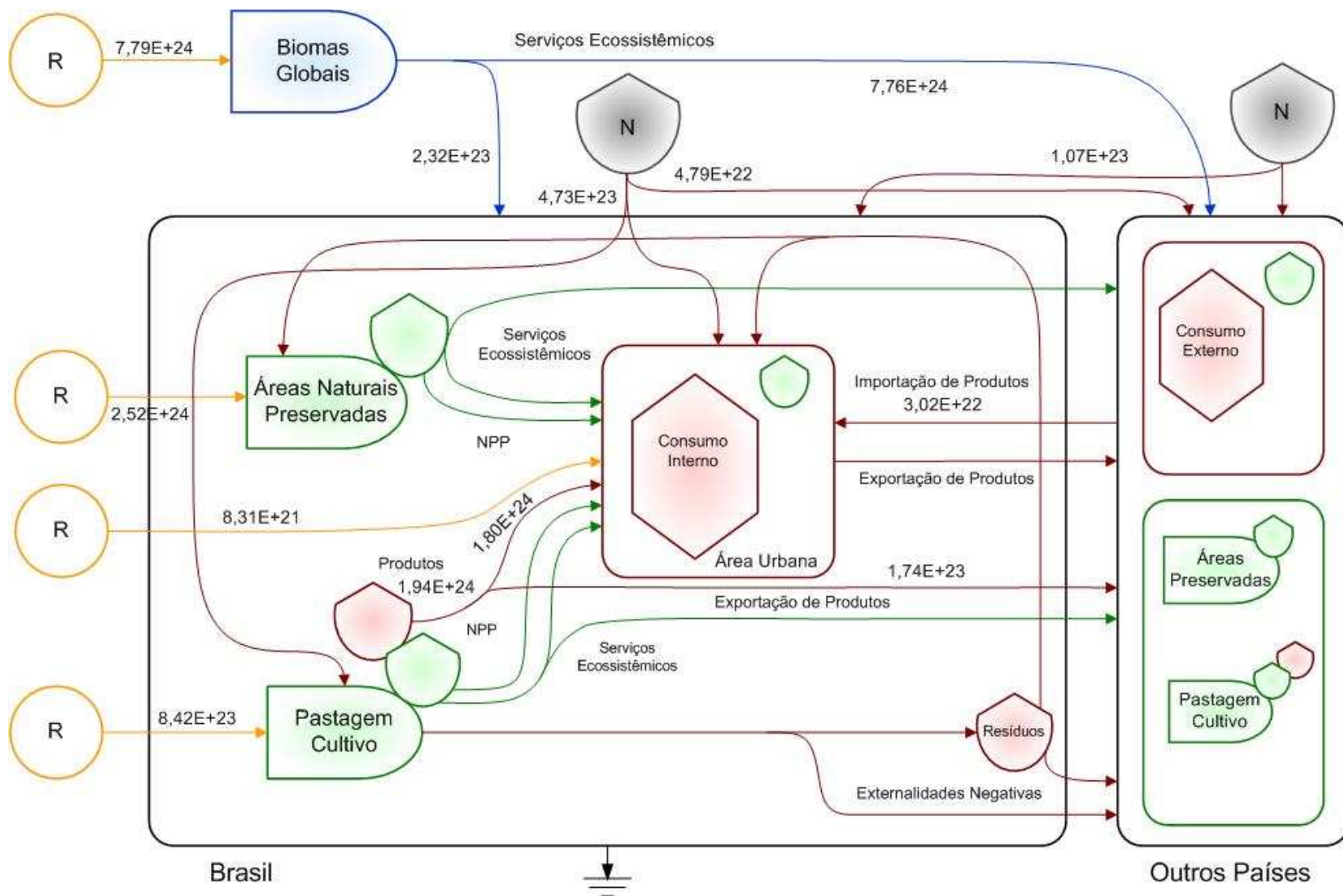


Figura 32: Diagrama Sistêmico Resumido do Brasil (valores em seJ/ano)

7.5. RELAÇÕES BIOCAPACIDADE-PEGADA

Segundo Monfreda et al. (2004), a comparação entre Pegada e Biocapacidade revela se o capital natural existente é suficiente para suportar o consumo e os padrões de produção. Um país em que a pegada excede a biocapacidade tem um déficit ecológico. Essa condição de déficit seria possível devido a dois fatores: importação de biocapacidade de outros países ou diminuição do seu próprio capital natural.

Essa definição é de certa forma controversa. Ao analisar-se a pegada mundial segundo a metodologia convencional para o ano de 2004, percebe-se um valor de 2,23 gha/pessoa. Já a biocapacidade tem um valor de 1,78 gha/cap, ou seja, um déficit ecológico mundial de 0,45 gha/pessoa. Segundo a definição de Monfreda et al. (2004), esse consumo além do que é oferecido pela natureza só é possível através da importação de recursos ou destruição do capital natural.

Se pensarmos segundo os conceitos da Análise Emergética, essa condição é justificada pelo uso de recursos não-renováveis, que permitem à humanidade extrapolar os limites energéticos naturais do planeta. Portanto, é mais conveniente pensar a biocapacidade como os recursos renováveis fornecidos pela natureza. Outro aspecto importante, é ressaltar que a unidade utilizada (gha ou hectare global) não é traduzida em espaços reais. Na verdade é um espaço com uma produtividade média global que torna possível a comparação entre consumo e oferta natural dos países.

7.5.1. SALDO ECOLÓGICO

Os resultados obtidos para o Brasil mostram uma biocapacidade de 64,71 gha/pessoa, enquanto que a pegada foi de 41,88 gha/pessoa. Assim:

$$\text{Saldo Ecológico} = 64,71 - 41,88 = 22,83 \text{ gha/pessoa}$$

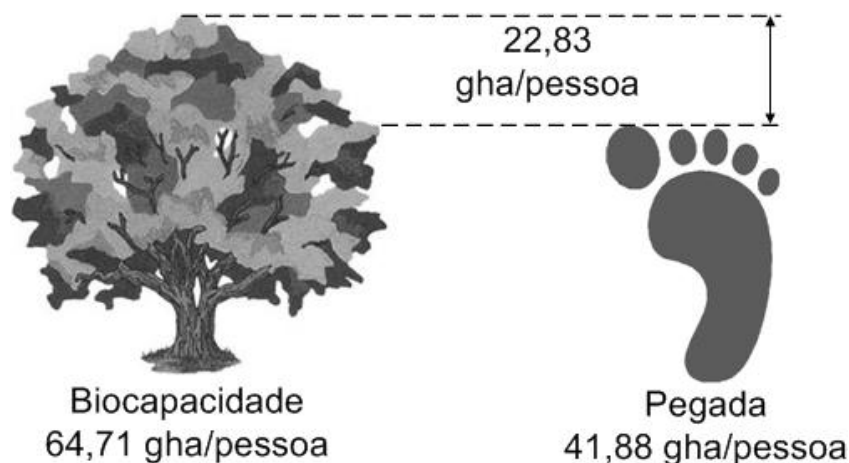


Figura 33: Saldo Ecológico do Brasil

O saldo positivo de 22,83 gha/pessoa mostra um bom desempenho para a realidade ecológica brasileira. É importante ressaltar que dos 64,71 gha/pessoa estimados para a biocapacidade, 28,99 gha/pessoa são provenientes da Floresta Amazônica. Caso esse valor fosse desconsiderado, o Brasil teria um déficit de 6,16 gha/pessoa.

Em uma análise mais “ecológica”, pode-se sugerir que esse saldo positivo está sendo utilizado de alguma forma. Parte desse valor pode estar relacionada à geração de serviços ecossistêmicos que beneficiam a população local ou mesmo a de outros países, afinal os serviços fornecidos pelos ecossistemas brasileiros beneficiam de forma direta ou indireta o funcionamento de todo o planeta. Na análise convencional de Monfreda et al. (2004), sugere-se que esse saldo positivo de biocapacidade poderia ser exportado para os países com déficits ecológicos, porém não se pode fazer essa afirmação com relação ao método proposto neste trabalho, pois ainda não foram realizadas estimativas para o mundo todo. No entanto, é possível que esse excedente gere serviços que beneficiem todo o planeta.

7.5.2. FATOR CAPACIDADE DE SUPORTE

Uma melhor análise seria feita se dividíssemos a biocapacidade pela pegada. Essa razão é chamada *Fator Capacidade de Suporte* (Siche, 2007), que significa quantas vezes um território pode suportar sua população com o estilo de vida atual e sem degradar o ambiente.

$$\text{Fator Capacidade de Suporte} = \frac{64,71}{41,88} = 1,53 \text{ gha/pessoa}$$

Esse valor revela que, se mantidos os padrões de consumo e a biocapacidade atuais, a população brasileira poderia crescer em cerca de 53%. Ferguson (2002) calculou a capacidade de carga de 147 países, incluindo o Brasil, usando como base de informação o relatório Living Planet Report 2002. Ele conclui que o Brasil, com seu estilo de vida da época era capaz de suportar 2,28 vezes sua população, um valor mais otimista do que encontrado nesse trabalho. Esses valores distintos podem ser explicados pela aplicação de diferentes metodologias. Ferguson (2003) usou como base informações calculadas através da metodologia tradicional da pegada ecológica.

7.6. COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS

Tabela 33: Pegada Ecológica do Brasil de acordo com diferentes métodos

Trabalho	Autor	Biocapacidade (gha/pessoa)	Pegada (gha/pessoa)
Relatório Planeta Vivo 2006 (Convencional)	Hails et al. (2006)	9,90	2,10
Pegada de Nações 2005 (baseado na NPP)	Venetoulis e Talberth (2007)	29,16	14,11
Pegada Ecológica baseada na Emergia	Pereira (2008)	64,71	41,88

Em uma comparação de balanço ecológico, pode-se assumir que o Brasil tem um melhor resultado com a abordagem baseada na análise emergética (64,71 – 41,88 = 22,83 gha/pessoa), seguido pelo método baseado na produtividade primária líquida (NPP) (29,16 – 14,11 = 15,05 gha/pessoa) e pela pegada ecológica convencional (9,90 – 2,10 = 7,80 gha/pessoa).

Aos compararmos as categorias cultivos, pastagens, peixes e energia ficam claras as grandes diferenças nas estimativas de pegada entre as 3 abordagens (figura 34). A metodologia proposta por Venetoulis e Talberth (2007) faz modificações com relação às estimativas referentes à pegada de recursos energéticos. Assim como na metodologia convencional, as estimativas são baseadas na capacidade de absorção de dióxido de carbono, porém elas levam em conta todo o planeta como superfície capaz de assimilar CO₂. Além disso, Venetoulis e Talberth utilizam taxas de absorção de CO₂ baseadas nos

relatórios do IPCC. Essas alterações fizeram com que a pegada de energia do Brasil fosse avaliada em 8,8 hectares globais/pessoa, ou seja, um valor próximo ao que encontramos com a metodologia baseada na energia (9,55 gha/pessoa).

Em todas as categorias selecionadas (figura 34), a Pegada Ecológica convencional aparece com os menores valores de consumo. Segundo os próprios autores (Monfreda et al., 2004), as estimativas nesse caso são subestimadas, porém a pegada convencional leva em conta muito mais produtos em suas estimativas do que foi utilizado nesse trabalho. Por exemplo, o cálculo convencional considera mais de 70 tipos de cultivos, enquanto nesse trabalho foram considerados apenas os mais importantes segundo os dados de produção.

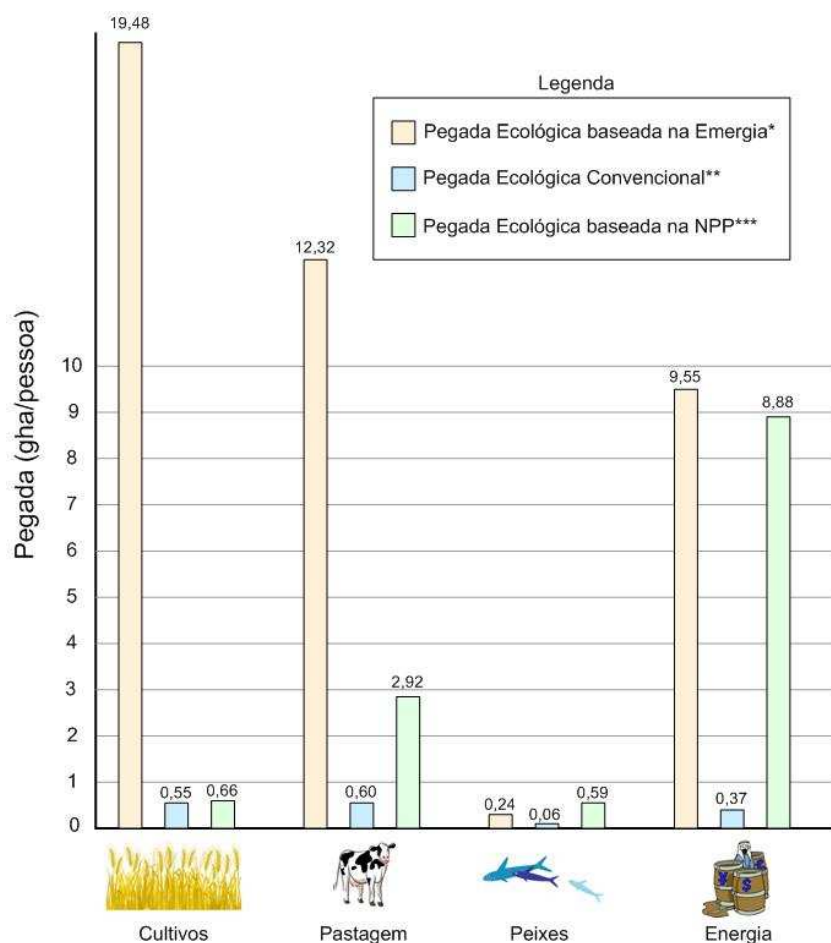


Figura 34: Pegada para categorias selecionadas segundo as 3 abordagens

Fontes: Hails et al. (2006), Venetoulis e Talberth (2007) e Pereira (2008)

*A pegada referente à pastagem engloba os itens carne e leite

**Dados do Living Planet Report da WWF com dados de 2004

***O Relatório Footprint of Nations 2005 utiliza dados de 2001

Dessa forma, fica evidente que as diferenças aqui encontradas não se referem somente aos dados utilizados, mas principalmente à metodologia empregada. A introdução da análise emergética no cálculo da pegada ecológica contribuiu para um resultado mais realista do ponto de vista ecológico, ou seja, o impacto das atividades humanas é muito maior.

Analisando a relação biocapacidade / pegada (Fator Capacidade de Suporte) para as três abordagens, é possível perceber que a situação ecológica do Brasil é melhor com a metodologia convencional ($BC/EF = 4,71$). Esse valor significa que em 2004 o território brasileiro poderia suportar até 4,7 vezes o tamanho de sua população. Segundo a metodologia de Venetoulis e Talberth, $BC/EF = 2,06$ e para a pegada ecológica baseada na energia, $BC/EF = 1,54$.

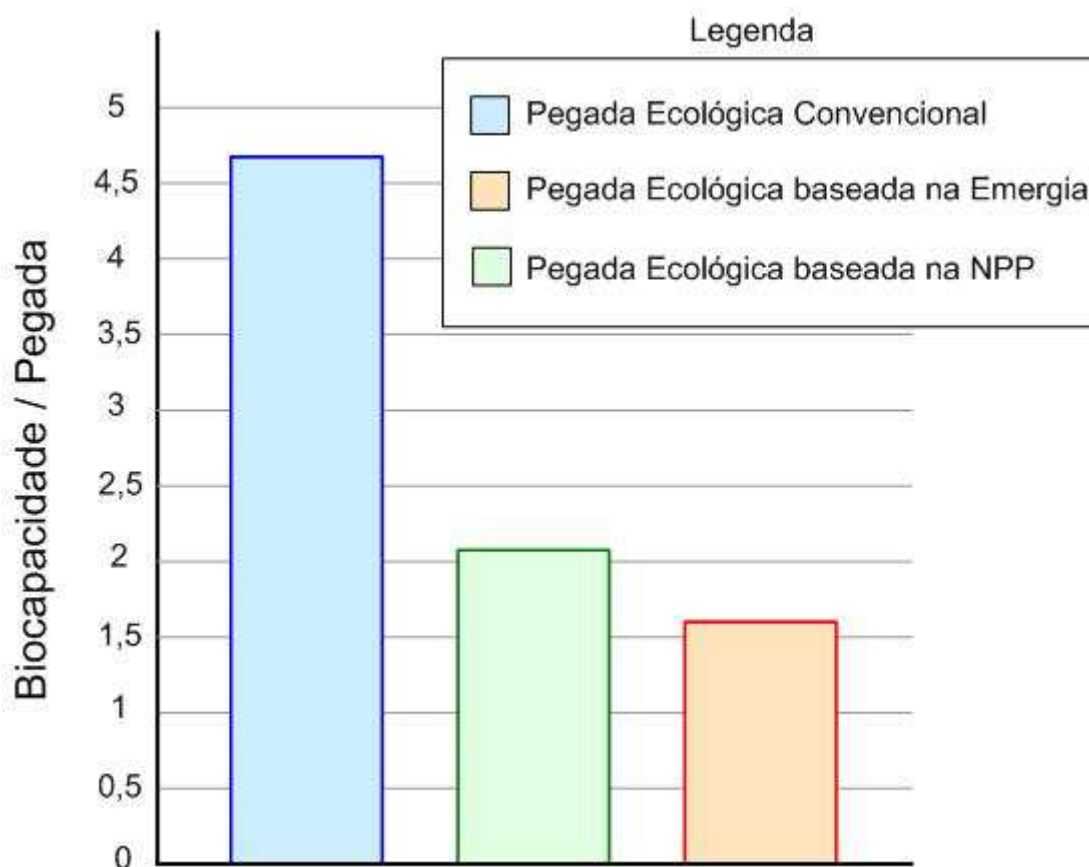


Figura 35: Fator Capacidade de Suporte segundo as 3 abordagens

Fontes: Hails et al. (2006), Venetoulis e Talberth (2007), Pereira (2008)

Um estudo realizado por Coelho et al. (1999) reportou resultados para o balanço emergético do Brasil para três anos (1996, 1989 e 1981). Segundo ele, no ano de 1996, a fração renovável de energia utilizada no país era de 69,95%, o que levaria a um fator capacidade de suporte de 0,70, porém esse estudo levou em conta somente os recursos renováveis utilizados na produção de bens.

Segundo o fator capacidade de suporte obtido nesse trabalho, se mantido o padrão de vida e considerada uma população atual de 180 milhões de pessoas, o Brasil poderia suportar até 277 milhões de habitantes. De acordo com projeções do IBGE (2004), a população do país chegará próximo aos 260 milhões por volta de 2050. Porém um dos aspectos mais importantes a serem considerados quando se avalia o impacto de uma população ou atividade humana sobre o ambiente é a demanda de recursos imposta sobre o meio. Portanto, se em 2050 essa demanda (pegada) tiver aumentado, com certeza a capacidade de suporte do país reduzir-se-á.

Através da análise da figura 35, fica evidente que o método proposto nesse trabalho (Pegada Ecológica baseada na Energia) mostrou resultados intermediários entre a metodologia convencional da Pegada Ecológica e a Análise Emergética. Dessa forma, pode-se afirmar que houve uma convergência entre os métodos.

7.7. DEFICIÊNCIAS DA PEGADA ECOLÓGICA CONVENCIONAL

7.7.1. DADOS AGREGADOS E DIFERENÇAS ENTRE OS TIPOS DE ÁREA

A primeira objeção feita à Pegada Ecológica está ligada justamente à suposta atratividade do método, segundo o qual o resultado obtido fornece um indicador unidimensional através da soma de todo o consumo relacionado direta ou indiretamente com os impactos ecológicos em termos de área utilizada. Isso requer que diferentes categorias de consumo sejam convertidas em áreas. Essa conversão é incompleta, pois não são levadas em conta as diferenças locais e regionais dos diferentes tipos de espaço. O maior problema é que fatores de conversão são usados como representantes dessas diferenças, porém eles não refletem mudanças ao longo do tempo, nem variações no espaço.

Esse problema é ampliado pela escolha de um sistema fixo de ponderação dos tipos de área. Algumas categorias recebem o mesmo “peso”, mesmo quando está claro que seus impactos no ambiente sejam bem distintos (van der Bergh e Verbruggen, 1999). Por exemplo, no procedimento da Pegada Ecológica, espaços utilizados para cidades e infra-estrutura recebem o mesmo peso de terras utilizadas para a agricultura.

O fator de rendimento, que representa a produtividade média de um tipo de área por país pode variar muito dentro do próprio sistema analisado, particularmente em países em que há diversidade de climas e vegetações como o Brasil. Por este motivo, quando se aplica o método para análises locais, regionais, bacias hidrográficas ou propriedades agrícolas se faz necessário calcular fatores de rendimento para cada divisão do sistema. Por exemplo, caso se avalie uma propriedade agrícola, poder-se-ia dividir a propriedade por tipos de cultivos. Assim, cada tipo de cultivo deve ter seu próprio fator de rendimento, e, conseqüentemente, sua pegada.

Essas suposições podem trazer resultados incondizentes com os impactos ambientais gerados pela atividade produtiva desenvolvida. Isso se torna um grande problema quando a Pegada Ecológica é promovida e utilizada como um critério para seleção de opções de políticas públicas. Segundo seus autores, a metodologia “...é um instrumento de planejamento que ajuda a traduzir as preocupações com sustentabilidade em ações públicas” (Wackernagel e Rees, 1996).

Críticas recentes exploram mais a fundo sua metodologia. Por exemplo, Wiedmann e Lenzen (2007) encontram inconsistências no processo de conversão de hectares a hectares globais devido ao fato da Pegada Ecológica ajustar rendimentos da produção primária a médias globais e não fazer o mesmo com os rendimentos da produção secundária. Já para Venetoulis e Talberth (2007), o uso das produtividades potenciais (GAEZ) para calcular os fatores de equivalência (ou fatores de conversão de ha a gha) não mede a verdadeira intensidade da pressão humana sobre os ecossistemas.

No entanto, em qualquer abordagem de planejamento, devem ser definidos os objetivos, limites e instrumentos a serem utilizados. Segundo van den Bergh e Verbruggen (1999), isso não foi feito na Pegada Ecológica. Logo, a metodologia por si só não poderia ser a base nem guia principal para solução de problemas públicos.

Acreditamos que o método possa ser usado como um indicador da situação do impacto das atividades humanas sobre o ambiente, porém uma análise mais profunda (talvez envolvendo outros métodos) deve ser feita para diagnosticar a situação e propor soluções.

7.7.2. USO HIPOTÉTICO E INSUSTENTÁVEL DA TERRA

Uma segunda objeção feita à Pegada Ecológica se relaciona com a dimensão do uso da terra. O primeiro aspecto importante a ser ressaltado é que “pegada” denota uma área hipotética e que pode ser facilmente interpretada como um área real de terra, não apenas pelo público em geral mas por políticos, tomadores de decisão, ambientalistas e pesquisadores acadêmicos. Isso pode ser interpretado como um caso de “falsa solidez” (van den Bergh e Verbruggen, 1999).

A natureza hipotética da Pegada Ecológica significa, por exemplo, que a pegada mundial pode exceder a área produtiva total disponível. Além disso, o método não faz distinção entre uso sustentável e uso insustentável da terra. Para se medir o nível de sustentabilidade de uma economia ou atividade, são necessários indicadores que foquem nos processos que contribuem para essa sustentabilidade ou insustentabilidade, como por exemplo, uso e degradação do solo. Logo, indicadores devem refletir tanto a qualidade quanto a quantidade de uso de recursos renováveis.

Uma distinção entre área sustentável e insustentável deve ser realizada como uma condição mínima para qualquer procedimento que pretende determinar em que extensão uma atividade ou região está contribuindo para o desenvolvimento (in)sustentável. A metodologia da Pegada Ecológica não permite uma comparação entre sustentabilidade ambiental e os tipos de uso da terra (intensivo ou extensivo) (van de Bergh e Verburggen, 1999).

Outra questão importante citada anteriormente nesse trabalho é que a Pegada Ecológica estabelece uma função única para cada tipo de área. No entanto, em muitos casos, o uso da terra fornece serviços e funções múltiplas.

7.7.3. USO SUSTENTÁVEL DE ENERGIA

A terceira objeção diz respeito ao método de medida do impacto associado ao uso de energia. As áreas requeridas para energia fóssil ocupam mais de 50% em média da pegada de países desenvolvidos. Como já mencionado, esse componente consiste na estimativa da área de floresta necessária para absorver as emissões de dióxido de carbono. Essa idéia é questionável, pois a assimilação de CO₂ pelas florestas é apenas uma das opções de compensar emissões e aparentemente não a mais eficaz. Além disso, a Pegada Ecológica considera uma taxa de seqüestro de 0,95 t C/ha/ano (Wackernagel et al., 2005). Assim, para cada tonelada de carbono emitido, assume-se uma pegada de 1,05 hectares. Porém esse cálculo está baseado no seqüestro de CO₂ por florestas em apenas dois anos pontuais (1980 e 1990), desconsiderando que essa taxa varia conforme a idade das árvores, período do ano, ecossistema, etc.

Segundo Van den Bergh e Verbruggen (1999), essa abordagem apresenta 2 problemas principais. Primeiro, pode ser que não exista terra disponível suficiente e adequada para florestas. Em outras palavras, esse cenário sustentável de energia pode esbarrar em barreiras técnicas (ou ambientais). Segundo, a solução dependeria da disponibilidade e do custo da terra, bem como da produtividade de reflorestamento. Todos esses aspectos diferem entre países e regiões, pois dependem do nível de desenvolvimento, da tecnologia disponível e de circunstâncias geográficas (incluindo clima e tipo de solo).

7.7.4. ÁREAS EXCLUÍDAS DO CÁLCULO

Uma questão já abordada durante a revisão bibliográfica desse trabalho é a exclusão arbitrária de áreas consideradas de baixa produtividade dos cálculos da Pegada Ecológica. Sob a perspectiva Venetoulis e Talberth (2007) que criticam a metodologia convencional, toda a Terra é relevante devido ao fato da maior parte da superfície terrestre participar da ciclagem de carbono.

Áreas excluídas do cálculo incluem desertos, tundras e oceanos. Parece totalmente incoerente desconsiderar áreas tão importantes ao funcionamento dos ciclos biogeoquímicos. Ao mesmo tempo em que estima a pegada da energia baseada na

capacidade de assimilação de CO₂ das florestas, a metodologia falha ao não reconhecer a importância, por exemplo, do seqüestro de CO₂ pelos oceanos, responsáveis por cerca de 2/3 da absorção total.

Portanto, apesar de serem regiões com baixa ou nula produção de biomassa para consumo humano, essas áreas desempenham funções essenciais ao planeta. Muitos ecossistemas que não são usados diretamente podem ter benefícios indiretos para seres humanos como fornecer biodiversidade ou serviços ecossistêmicos (Venetoulis e Talberth, 2007).

Segundo os próprios autores a metodologia é falha ao não avaliar atividades que reduzem a capacidade de regeneração da natureza. Por exemplo, o uso de materiais para os quais a biosfera não tem nenhuma capacidade de assimilação significativa (plutônio e outros elementos radioativos associados com a produção de energia nuclear, bifenilas policloradas (PCBs), e clorofluorcarbonos (CFCs). Também são excluídos processos que danificam irreversivelmente a biosfera, por exemplo, extinção de espécies, destruição de aquíferos, desmatamento e desertificação. (Loh e Wackernagel, 2004).

7.8. DEFICIÊNCIAS DA ANÁLISE EMERGÉTICA

7.8.1. SUSTENTÁVEL OU INSUSTENTÁVEL?

A Análise Emergética não define claramente qual é o indicador de sustentabilidade, se a RENOVABILIDADE (REN) ou o ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE EMERGÉTICO (EmSI). Atualmente pela metodologia não há um padrão do que é sustentável ou insustentável (Siche, 2007). Alguns autores indicam que analisando-se um longo período, sistemas com altos valores de REN seriam sustentáveis (Brown e Ulgiati, 2004), mas não estabelecem um valor mínimo de REN para sejam considerados sustentáveis.

Brown e Ulgiati (1997) sugeriram o uso do Índice de Sustentabilidade Emergético para avaliar a sustentabilidade de sistemas. Porém no caso de países, Brown e Ulgiati (1997) interpretam o índice como um indicador do grau de desenvolvimento do país e não de sustentabilidade.

Segundo Ortega et al. (2008), a renovabilidade deveria ser calculada em função das contribuições parciais renováveis de materiais e serviços da economia, além dos recursos renováveis importados. Assim a fórmula refinada da renovabilidade emergética seria:

$$R / Y = (R_1 + R_2 + M_R + S_R + R_I) / (Y_{CL} + Y_I)$$

Onde:

R_1 = Recursos Renováveis

R_2 = Recursos Renováveis disponibilizados pela ação da Biodiversidade

M_R = Fração Renovável dos Materiais da Economia

S_R = Fração Renovável dos Serviços da Economia

R_I = Recursos Renováveis Importados

Y_{CL} = Energia Utilizada na Produção para Consumo Local

Y_I = Energia Utilizada na Produção de Produtos Importados

7.8.2. DETERMINAÇÃO DOS FLUXOS RENOVÁVEIS

A Análise Emergética ainda não tem um método satisfatório para determinar o volume de fluxo renovável usado no sistema. Teoricamente, considera-se somente o maior fluxo renovável dentre todos os fluxos renováveis para evitar a dupla contabilidade (Odum, 1996). Porém essa abordagem não é padronizada, sendo que alguns autores, exemplo de Agostinho (2005), preferem somar todos os fluxos renováveis. É importante ressaltar também que esses fluxos não estão distribuídos de forma homogênea pelo globo.

Além disso, segundo Ortega et al. (2008) alguns fluxos renováveis são disponibilizados pela ação da biodiversidade presente nos ecossistemas preservados. Portanto, a destruição ou diminuição dessa biodiversidade diminuiria a disponibilização desses recursos renováveis. Na Análise Emergética convencional esses fluxos não são contabilizados.

Outra consideração a ser feita se refere ao fato da metodologia emergética ter surgido como uma ferramenta capaz de contabilizar os serviços ambientais, o que não é feito pela economia convencional. Apesar disso, na maioria dos trabalhos, esses fluxos

não são incluídos nos cálculos. Talvez isso ocorra devido à dificuldade de tradução desses serviços em termos de fluxos emergéticos.

7.8.3. TRANSFORMIDADE

A transformidade é o fator de conversão dos fluxos de massa ou energia para fluxos emergéticos, ou seja, é a emergia específica do recurso ou processo. Seu papel é de fundamental importância nos cálculos. Apesar disso, as informações sobre esse fator são escassas e não há um banco de dados onde se possa obtê-los de forma fácil. Esse aspecto é justamente uma das vantagens da Pegada Ecológica: a facilidade de acesso aos dados utilizados nos cálculos.

A transformidade muda com o tempo e não é única para cada classe de produtos. Além disso, ela varia de acordo com a forma de produção, ou seja, o mesmo bem produzido em países diferentes terá valores de transformidade distintos. Esse é um dos grandes problemas do método. Por ser muito sensível, pequenas variações no valor da transformidade, podem mudar drasticamente os resultados finais.

Além dessas observações, Ortega et al. (2008) acrescentam que, assim como no caso dos fluxos renováveis, a transformidade também apresenta uma fração renovável e outra não-renovável. Essa consideração pode levar a valores diferentes de transformidades daqueles já tabelados na literatura.

8. CONCLUSÕES

A incorporação da Análise Emergética na metodologia proposta ajuda a superar algumas deficiências do cálculo convencional da Pegada Ecológica. Uma das características mais atraentes da emergia é que sua unidade comum (seJ) permite que todos os recursos sejam comparados na mesma base. No cálculo convencional da Pegada Ecológica, um sistema de peso ou ponderação é usado para distinguir as diferentes áreas e converter as produções em termos de área.

O cálculo convencional da biocapacidade se refere somente à terra que é “ecologicamente produtiva para propósitos humanos” e exclui, por exemplo, desertos, geleiras e oceanos das estimativas. No entanto, decidir que áreas devem ser retiradas dos cálculos é totalmente arbitrário. Todas essas áreas foram incluídas em nossos cálculos e os resultados mostram uma contribuição importante para a biocapacidade do país. Muitos benefícios indiretos aos humanos da biodiversidade e outros atributos dos ecossistemas presentes no meio ambiente não são ainda conhecidos. Nesse trabalho, a importância dos serviços ecossistêmicos e externalidades negativas é reconhecida, porém não foi contabilizada.

Uma grande vantagem de se utilizar a análise emergética junto à pegada ecológica é a possibilidade de se medir o uso de recursos dos ecossistemas. Deve ser destacado, no entanto, que a complexidade dos ecossistemas torna difíceis os cálculos de transformidade. Não existe uma única transformidade para todas as classes de produto ou processo e seus valores variam com o tempo, dificultando uma criação de banco de dados. Isso afeta a confiabilidade das conclusões, uma vez que as considerações feitas para se estimar valores das transformidades podem trazer diferenças aos resultados finais.

A incorporação da divisão de categorias e da comparação entre oferta da natureza e consumo humano demonstrou ser bastante interessante para o método proposto, pois ajudou a torná-lo mais didático. Apesar disso, as categorias consideradas em cada um dos componentes não foram as mesmas, não permitindo uma comparação total entre as mesmas como é realizado no método convencional.

O método proposto nesse trabalho mostrou que o Brasil tem um balance ecológico positivo, assim como nos resultados da metodologia convencional. No entanto, a pegada ecológica baseada na emergência mostrou um cenário mais pessimista em relação à realidade ecológica do Brasil. Segundo a metodologia proposta, o fator capacidade de suporte do Brasil (biocapacidade / pegada) apresentou um valor menor daquele encontrado pelas metodologias convencionais.

Uma análise mais aprofundada dos resultados de biocapacidade demonstraram que a Floresta Amazônica contribui com quase 50% de todos os recursos renováveis que ingressam no país por ano. Além disso, ficou claro que os valores utilizados para a preservação das vegetações originais alteram drasticamente os resultados de biocapacidade.

Já o resultado obtido para a pegada, demonstrou que a categoria cultivo apresentou o maior impacto sobre o ambiente. Porém se considerássemos que metade do cultivo de cana-de-açúcar se destina à produção de etanol e transferíssemos metade de seu impacto para a categoria de recursos energéticos, as pegadas referentes a cultivos e a recursos energéticos ficaram com valores muito próximos.

É importante ressaltar que o presente trabalho não levou em consideração para fins de cálculo serviços ecossistêmicos ou externalidades negativas. Seria de fundamental importância incluí-los nas estimativas de biocapacidade e de consumo, uma vez que pretende-se tornar o método mais voltado para a visão ecológica. De toda forma, essa proposta metodológica pode ser um passo importante na elaboração de um indicador de sustentabilidade mais robusto e que reflita de forma mais precisa e didática a realidade ecológica de países.

Como sugestão para futuras pesquisas, deveria ser feito um cálculo aplicando a metodologia proposta nesse trabalho para o planeta Terra como um todo, ou seja, estimar pegada e biocapacidade mundiais. Dessa forma, é possível estabelecer-se um padrão global de valores, para posteriormente compará-los com estimativas obtidas para os países. Além disso, seria interessante incluir diferentes cenários com variações nas emissões de CO₂, CH₄, N₂O, que afetam a intensidade e distribuição de calor pela superfície terrestre. As mudanças climáticas podem levar a deslocamentos populacionais

e de plantações afetando principalmente a produção agrícola e, conseqüentemente, a disponibilidade de alimentos.

Ainda não existe um indicador de sustentabilidade que consiga demonstrar de forma inequívoca a situação da realidade ecológica de países. A maioria dos métodos, mesmo os ecológicos, ainda não consegue incorporar nos cálculos muitos conceitos contidos na teoria do desenvolvimento sustentável, principalmente as questões sociais relacionadas ao modelo de produção capitalista empregado na maior parte do mundo. Por esses motivos, o método proposto nesse trabalho ainda não é completo. Um diagnóstico de sustentabilidade de países a ser utilizado como modelo para formulação de políticas públicas deve ser analisado com base em vários métodos e critérios. É importante destacar que, mais importante do que os números em si, é o papel daqueles que avaliam o resultado e propõem os caminhos a serem seguidos.

9. REFERÊNCIAS

ABDON, M.M.; DA SILVA, J.S.V.; SOUZA, I.M.; RAMPAZZO, J.; FERRARI, D.L. Desmatamento no Bioma Pantanal até o ano 2002: Relações com a fitofisionomia e limites municipais. Revista Brasileira de Cartografia, 59/01, 2007.

AGOSTINHO, F. D. R. Uso de análise emergética e sistemas de informações geográficas no estudo de pequenas propriedades agrícolas. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas. 2005.

AMTHOR, J.S. Terrestrial Ecosystem Responses to Global Change: a research strategy. ORNL Technical Memorandum 1998/27, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. 37 pp. 1998.

ARROW, K.; BOLIN, B.; COSTANZA, R.; DASGUPTA, P.; FOLKE, C.; HOLLING, C.S.; JANSSON, B.; LEVIN, S.; MALER, K.; PERRINGS, C.; PIMENTEL, D.. Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment. Ecological Applications, Vol. 6, No. 1. pp. 13-15. 1995.

AYRES, R.U. Commentary on the Utility of the Ecological Footprint Concept. Ecological Economics 32, p. 347-349, 2000.

BENTON, M.J. Diversification and extinction in the history of life. Science, 268, 52–58. 1995.

BENTON, M.J. Biodiversity on land and in the sea. Geological Journal, 36, 211–230. 2001.

BEVERTON, R.J.H.; HOLT, S.J. On the dynamics of exploited fish populations. Fisheries Investigations Series II. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, London. 1957.

BOSSEL, H. Indicators for sustainable development: Theory, method, applications. International Institute for Sustainable Development, Winnipeg, Manitoba, Canada, 124 pp. 9. 1999.

BROWN, M.T. Environmental Accounting: Emergy Perspectives on Sustainability. Valoración económica en el uso de los recursos naturales y el medio ambiente. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico del Cono Sur. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Montevideo, Uruguay, pp. 47- 70. 1998.

BROWN, M.T.; BARDI, E. Folio #3: Emergy of ecosystems. Handbook of Emergy Evaluation: A compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. Gainesville, Fl., Center for Environmental Policy, University of Florida. 2001.

BROWN, M.T.; ODUM, H.T.; MURPHY, R.C.; CHRISTIANSON, R.A.; DOHERTY, S.J.; MCCLANAHAN, T.R.; TENNENBAUM, S.E. Rediscovery of the world: developing an interface of ecology and economics. In C.A.S. Hall (Ed.), Maximum Power: The Ideas and Applications of H.T. Odum, pp. 216-250. Boulder: University of Colorado Press. 1995.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. Ecol. Eng. 9, 51–69. 1997.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Emergy measures of carrying capacity to evaluate economic investments. Population and environment: a journal of interdisciplinary studies, vol. 22, number 5. 2001.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. Ecol. Eng. 9, p. 51–69. 1997.

- BROWN, M., ULGIATI, S. Emergy Analysis and Environmental Accounting. *Encyclopedia of Energy*, 2:329-353. 2004.
- BUCKUP, L.; NABINGER, C.; BOLDRIN, I.I. PILLAR, V.P.; SUERTEGARAY, D.; BRACK, P.; LANNA, A.E.; BUCKUP, G.B. Porque respeitar o zoneamento. UFRS. Porto Alegre, 2007.
- CADDY, J.; STAMATOPOULOS, C. Mapping growth and mortality rates of crevice-dwelling organisms onto a perforated surface: the relevance of 'cover' to the carrying capacity of natural and artificial habitats. *Estuarine Coastal of Shelf Science*, 31, 87–106. 1990.
- CATTON, W. Carrying capacity and the Limits to Freedom. Paper prepared for Social Ecology Session 1, XI World Congress of Sociology. New Delhi, India. 1986.
- CATTON, W. Carrying capacity and the death of a culture: A tale of two autopsies. *Sociological Inquiry* 63(2): 202-223. 1993.
- CAVALETT, O. Análise emergética da psicultura integrada à criação de suínos e de pesquepagues. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas. 2004.
- CHAMBERS, N.; SIMMONS, C.; WACKERNAGEL, M. Sharing Nature's Interest: Ecological Footprints as an Indicator of Sustainability. Earthscan, London. 2000.
- CHEN, B.; CHEN, G.Q. Ecological footprint accounting based on emergy: A case study of the Chinese society. *Ecological Modelling* 198, 101–114. 2006.
- CHRISTENSEN, V.; PAULY, D. Changes in models of aquatic ecosystems approaching carrying capacity. *Ecological Applications*, 8, 104–109. 1998.
- COHEN, J.E. Population growth and Earth's human carrying capacity. *Science*, 269, 341–346. 1995.
- COELHO, O.; ORTEGA, E.; COMAR, V. "Balanço de Emergia do Brasil (dados de 1996, 1985 e 1981)". In Ortega, Safonov & Comar (ed.), 1999: "Introduction to Ecological Engineering, with Brazilian case studies". 400 pages. Unicamp, Campinas, SP, Brazil. Preliminary version for authors revision. To be published by Elsevier (Holland) and Unicamp Press (Brazil).
- COMAR, M.V. Avaliação emergética de projetos agrícolas e agroindustriais: a busca do desenvolvimento sustentável. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas. 1998.
- COSTANZA, R; HANNON, B.M. Dealing with the mixed units problem in ecosystem network analysis. pp.90-115 in: Wulff, F., Field, J. G. & Mann, K. H., (Eds.), *Network analysis of marine ecosystems: methods and applications*. Springer-Verlag, Heidelberg. 1989.
- COSTANZA, R. Ecological Sustainability, Indicators and Climate Cchange. Paper prepared for the IPCC Expert Meeting on "Development, Equity, and Sustainability", Colombo, Sri Lanka, 27-29 April. 1999.
- COSTANZA, R. The dynamics of the ecological footprint concept. *Ecological Economics* 32, 341-345. 2000.
- COSTANZA, R.; PATTEN, B. C. Defining and predicting sustainability. *Ecological Economics* 15:193-196. 1995.

DAILY, G.C., EHRLICH, P.R. Population, Sustainability, and Earth's Carrying Capacity: A Framework for Estimating Population Size and Lifestyles that Could Be Sustained Without Undermining Future Generations. *BioScience* 42:761-71. 1992.

DAILY, G.C., EHRLICH, P.R. Socioeconomic Equity, Sustainability, and Earth's Carrying Capacity. *Ecological Applications*. 6(4):991-1001. 1996.

DALY, H. E. On Economics as a Life Science. *Journal of Political Economy* 76, 392-406. 1968.

DALY, H. E. Sustainable Development: from Concept and Theory to Operational Principles. *Population and Development Review*, vol. 16, Supplement: Resources, Environment, and Population: Present Knowledge, Future Options, pp. 25-43. 1990.

DIJKMAN, J. Carrying capacity: outdated concept or useful livestock management tool? overseas Development Institute. 1999.

Disponível em: <http://www.odi.org.uk/pdn/drought/dijkman.html>

Acesso em: 09/04/2008.

DOS SANTOS, C.P.F.; VALLES, G.F.; SESTINI, M.F.; HOFFMAN, P.; DOUSSEAU, S.L.; DE MELLO, A.J.H. Mapeamento dos Remanescentes e Ocupação Antrópica no Bioma Amazônia. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 de abril de 2007, INPE, 6941-6948. 2007.

EEA JRC/GVM 2000. EU Joint Research Center, Global Vegetation Monitoring Unit. Global Land Classification Database (GLC 2000), European Commission, Brussels, Belgium. 2000.

EHRLICH, P.R. The population bomb. Ballantine Books, New York. 1968.

EHRLICH, P. R.; HOLDREN, J.P. Impact of population growth. *Science* 171, 1212-1217. 1971.

EUROSTAT. Towards Environmental Pressure Indicators for the EU. Luxembourg, Eurostat, European Commission. 2000.

FAO - Food and Agriculture Organization. The State of World Fisheries and Aquaculture 2004. Editorial Production and Design Group Publishing Management Service FAO, Rome, Italy.

Disponível em: <http://www.fao.org/DOCREP/007/y5600e/y5600e00.htm>

Acesso em: 03/01/2008

FAO – Food and Agriculture Organization. 2005. Global Forest Resources Assessment 2005. Forestry Department of the United Nations. Rome, Italy.

Disponível em: <http://www.fao.org/forestry>

Acesso: 03/01/2008

FERGUSON, A. Living Planet Report 2002. World Wide Fund for Nature International (WWF), Zoological Society of London (ZSL), Global Footprint Network, Gland, Switzerland. 2002.

FMI. Fundo Monetário Internacional. World Economic Outlook Reports. 2008.

Disponível em: <http://www.imf.org/external/>

Acesso em: 23/11/2007.

FRANCA-ROCHA, W.; SILVA, A.B.; NOLASCO, M.C.; LOBÃO, J.; CHAVES, J.M.; DA ROCHA, C.C. Levantamento da cobertura vegetal e do uso do solo do Bioma Caatinga. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 de abril de 2007, INPE, 2629-2636. 2007.

FUTUYMA, D.J. Evolutionary biology. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, USA, 1998.

GEORGESCU-ROEGEN, N. The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge (EUA): Harvard University Press. 1971.

GEORGE, C.; DIAS, S. Sustainable Consumption and Production – Development of an Evidence Base: Study of Ecological Footprinting. Final Report, Department for Environment, Food & Rural Affairs. Ref: CTHS0401. 134p. 2005.

HABERL, H.; ERB, K.H.; KRAUSMANN, F. Human appropriation of net primary production and species diversity in agricultural landscapes. Agriculture, Ecosystems, and Environment 102(2), 113-118, 2004.

HAILS, C.; LOH, J.; GOLDFINGER, S. Living Planet Report 2006. World Wide Fund for Nature International (WWF), Zoological Society of London (ZSL), Global Footprint Network, Gland, Switzerland. 2006.

HARDIN, G. Cultural Carrying Capacity: A Biological Approach to Human Problems. BioScience, 36:350-367. 1986.

HOLDREN, J.P. Population and the Energy Problem. Population Environment. 12: 231-255. 1991.

HOUSE, J.; PRENTICE, C.; LE QUERÉ, C. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. Global Change Biology (8), 1047-1052. 2002.

HUTCHINSON, G.E. Homage to Santa Rosalia or why are there so many kinds of animals. American Naturalist, 870, 342–361. 1959.

HUTCHINSON, G.E. An Introduction to Population Ecology. Yale University Press, New Haven. 1979.

HUTCHINSON, G.E.; WOLLACK, A. Studies on Connecticut lake sediments. II. Chemical analyses of a core from Linsley Pond, North Branford. American Journal of Science, 238, 493– 517. 1940.

IBAMA. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 2008.
Disponível em: www.ibama.gov.br.
Acesso em: 02/02/2008.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da População do Brasil. 2004.
Disponível em: www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/
Acesso em: 23/12/2007.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Economia. 2008.
Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/mapa_site/mapa_site.php#economia
Acesso em: 20/02/2008.

IIASA e FAO. Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) 2000 CD-ROM. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and Food and Agriculture Organization (FAO), Rome. 2000.

IMHOFF, M.; BOUNOUA, L.; RICKETTS, T.; LOUCKS, C.; HARRISS, R.; LAWRENCE, W. Global patterns in human consumption of net primary production. Nature, 429, 870–873. 2004.

IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, UK, Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001.

- ISARD, W. *Ecologic-Economic Analysis for Regional Development*. Free Press. New York. 1972.
- KLEIN, D. R. The Introduction, Increase, and Crash of Reindeer on St. Matthew Island. *J. Wildl. Manage.* 32:350-367. 1968.
- KHANNA, N. Measuring environmental quality: an index of pollution. *Ecological Economics*, 35, 2, 191-202. 2000.
- LENZEN M.; MURRAY, S.A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. *Ecological Economics* 37(2), 229-255. 2001.
- LENZEN, M.; BORGSTROM, C.; BOND, S. On the Bioprodutivity and Land-Disturbance Metrics of the Ecological Footprint. *Ecological Economic* 61. p. 6 - 10. 2007.
- LEVETT, R. Footprinting: a Great Step Forward. but Tread Carefully. *Local Environment* 3(1), p. 67-74. 1998.
- LINDEMAN, R.L. The tropho-dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 23, 157–175. 1942.
- LLUCH-BELDA, D. Concepto de nicho ecológico. Ensayo predoctoral. Escuela Nacional de Ciências Biológicas - Instituto Politécnico Nacional, México. 1978.
- LOH, J.; WACKERNAGEL, M. Living planet report. 2004. World Wide Fund for Nature International (WWF), UNEP World Conservation Monitoring Centre, Global Footprint Network, Gland, Switzerland. 2004.
- MALEY, C.C. The evolution of biodiversity: a simulation approach. Department of Electrical Engineering and Computer Science. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, USA. 1998.
- MALTHUS, T.R. *An Essay on the Principle of Population* [1st ed. of 1798]. Pickering, London. 1986.
- MANTOVANI, J.E.; PEREIRA, A. Estimativa da integridade da cobertura vegetal de cerrado através de dados TM/Landsat. *Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos, Brasil, 11-18 de setembro de 1998, INPE, 1455-1466. 1998.
- MARGALEF, R. *Ecología*. Editorial Omega, Barcelona, España. 1974.
- MARTÍNEZ ALIER, J. *De la Economía Ecológica al Ecologismo Popular*. Barcelona: Icaria. 1994.
- MCCOOL, S.F.; STANKEY, G.H. Indicators of Sustainability: Challenges and Opportunities at the Interface of Science and Policy. *Environmental Management* Vol. 33, No. 3, pp. 294–305. Springer-Verlag, New York. 2004.
- MEADOWS, D.H.; MEADOWS, D.L.; RANDERS, J.; BEHRENS, W.W. *The limits to growth: a report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, New York. 1972.
- MECH, L. D. *The Wolves of Isle Royale. Fauna of the National Parks of the United States*, Fauna Series 7. 1966.
- MENCZER, F. Life-like agents: internalizing local cues for reinforcement learning and evolution. PhD Thesis. Computer Science and Cognitive Science University of California San Diego. 1998.
Disponível em: <http://www.informatics.indiana.edu/fil/papers.asp>
Acesso em: 03/04/2008.
- MILLER, A.I.; SEPKOSKI, J.J. Modeling bivalve diversification: the effect of interaction on a macroevolutionary system. *Paleobiology*, 14, 364–369. 1988.

MITCHELL, G. Problems and fundamentals of sustainable development indicators. *Sustainable Development*, 4 (1), 1-11. 1996.

MITCHELL, R.C.; CARSON, R.T. Using surveys to value public goods: the contingent valuation method. *Resource for the future*. Washington, DC, 463. 1989.

MITTERMEIER, R.; ROBLES, P.; HOFFMAN, M.; PILGRIM, J.; BROOKS, T.; MITTERMEIER, C.G. Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Washington, DC: Conservation International. 2005.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Portal Brasileiro sobre Biodiversidade. Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas. 2007.

Disponível em: www.mma.gov.br

Acesso: 03/03/2008.

MOFFATT, I. *Ecological Footprints and Sustainable Development*. *Ecological Economics* 32. 359-362. 2000.

MONFREDA, C.; WACKERNAGEL, M.; DEUMLING, D. Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy* 21 (2004): 231-246. 2004.

MUELLER C.; TORRES, M.; MORAIS, M. Referencial básico para a construção de um sistema de indicadores urbanos. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). 1997.

O'MEARA, M. Explorando uma Nova Visão para as Cidades. *Estado do Mundo*, 138-157. 1999.

ODUM, E.P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 164, 262-270. 1969.

ODUM, E.P. *Ecology and Our Endangered Life-Support Systems*. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts. 1989.

ODUM, H.T.; PINKERTON, R.C. Time's speed regulator: the optimum efficiency for maximum power output in physical and biological systems. *Am. Scientist* 43 (2), 331-343. 1955.

ODUM, H.T. *Systems Ecology: An Introduction*. John Wiley, NY, p. 644 (revised in 1994). *Ecological and General Systems: An Introduction to Systems Ecology*. University Press of Colorado, P.O. Box 849, Niwot 80544). 1983.

ODUM, H.T. Self-organization, transformity and information. *Science* 242, 1132-1139. 1988.

ODUM, H.T. *Ecological and General Systems - An Introduction to Systems Ecology*. University Press of Colorado, USA. 1994.

ODUM, H.T. *Environmental accounting, emergy and decision making*. New York: J. Wiley. 370 p. 1996.

ODUM, H.T., BROWN, M.T., WILLIAMS, S.B. *Handbook of Emergy Evaluations Folios 1-4*. Center for Environmental Policy. University of Florida, Gainesville. 2000.

ONU. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat. *World Population Prospects: The 2006 Revision*. United Nations. New York. 2007

OPSCHOOR, H. The Ecological Footprint: Measuring rod or Metaphor? *Ecological Economics* 32. p. 363-365, 2000.

OPSCHOOR, J.B.; REIJNDERS, L. Towards sustainable development indicators. In: O. Kuik and H. Verbruggen (Editors), In Search of Indicators of Sustainable Development. Dordrecht, pp. 7-27. 1991.

ORTEGA, E. Contabilidade e Diagnóstico de sistemas usando valores dos recursos expressos em energia. Campinas. 2002.

Disponível em: <http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/resumo.pdf>

Acesso em: 10/01/2007.

ORTEGA, E.; GUSMAN, J.M.; AMBROSIO, L.A.; BESKOW, P.; MARGARIDO, L.A.; TAKAHASHI, F. Proposal to Review the Emergy Indices for a Proper Assessment of Sustainable Rural Systems. 5th Biennial Emergy Research Conference – Theory, Applications and Methodologies. Gainesville, Florida, Center for Environmental Policy, University of Florida. 2008.

PAGE, T. Conservation and Economic Efficiency. Johns Hopkins University Press, Baltimore. 1977.

PAINE, R.T. Food web complexity and species diversity. American Naturalist, 100, 850–860. 1966.

PAULY, D.; CHRISTENSEN, V. Primary production required to sustain global fisheries. Nature, 374, 255–257. 1995.

PEARCE, D.; MARKANDYA, A.; BARBIER, E. Blueprint for a Green Economy. London, Earthscan Publications, Ltd. 1989.

PEARCE, D.W.; TURNER, R.K. Economics of Natural Resources and the Environment. New York, NY. 1990.

PONCE-HERNANDEZ, R.; KOOHAFKAN, P.; ANTOINE, J. Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004.

PRABHU, R.; COLFER, C.J.P.; DUDLEY, R.G. Guidelines for developing, testing and selecting criteria and indicators for sustainable forest management. Toolbox Series, 1. Indonesia. 1999.

RAPPORT, D.J. Ecological Footprints and Ecosystem Health: Complementary Approaches to a Sustainable Future. Ecological Economics 32. p. 381-383. 2000.

REES, W. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: What urban economics leaves out. Environment and Urbanization 4 (2), 121 –130. 1992.

REES, W. Revisiting Carrying Capacity: Area-Based Indicators of Sustainability. Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies Volume 17, Number 3. 1996.

RENNINGS, K.; WIGGERING, H. Steps towards indicators of sustainable development: Linking economic and ecological concepts. Ecological Economics 20, p 25-36. 1997.

ROBINSON, J.G. The limits to caring: sustainable living and the loss of biodiversity. Conservation Biology, 7, 20–27. 1993.

RODRIGUES, A.S.L.; ANDELMAN, S.J.; BAKARR, M.I.; BOITANI, L.; BROOKS, T.M.; COWLING, R.M. Global gap analysis: Towards a representative network of protected areas. Advances in Applied Biodiversity Science, 5, 73–74. 2003.

ROEDEL, P. M. Optimum Sustainable Yield as a Concept in Fisheries Management. Special Publication No. 9, American Fisheries Society, Washington, D.C. 89 pp.. 1975.

ROJSTACZER, S.; STERLING, S.; MOORE, N. Human appropriation of photosynthesis products. *Science*, 294, 2549–2552. 2001.

ROMEIRO, A.R. Economia ou Economia Política da sustentabilidade? Texto para Discussão. IE/UNICAMP, Campinas, n. 102. 30p. 2001.

RUNNING, S.; NEMANI, R.; HEINSCH, F.; ZHAO, M.; REEVES, M.; HASIMOTO, H. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *BioScience*, 54(6), 547-559. 2004.

SCHEFFER, V. B. The Rise and Fall of a Reindeer Herd. *Science Monthly* 73, 356-362. 1951.

SHELL, D.M. Declining carrying capacity in the Bering Sea: isotopic evidence from whale baleen. *Limnology and Oceanography*, 45, 459–462. 2000.

SCIUBBA, E.; ULGIATI, S. Energy and exergy analyses: complementary methods or irreducible ideological options? *Energy* 30, 1953–1988. 2005.

SEI. Conventional Worlds: Technical Description of Bending the Curve Scenarios. Stockholm, Stockholm Environment Institute (SEI), PoleStar Series Report 8. 1998.

SEIDL, I.; TISDELL, C.A. Carrying Capacity Reconsidered: from Malthus' Population Theory to Cultural Carrying Capacity. *Ecological Economics* 31, p. 395–408. 1999.

SHIELDS, D.; SOLAR, S.; MARTIN, W. The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. *Ecological Indicator*, 2 (1-2), 149-160. 2002.

SHUANGLIN, D.; DESHANG, L.; KEHOU, P. On the carrying capacity of mariculture. *Journal of Oceanography of the University of Qingdao*, 2, 253–258. 1998.

SICHE, J.R.. Avaliação Ecológica-Termodinâmica e Econômica de Nações: o Peru como estudo de caso. Si12a Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas. 2007.

SICHE, J.R., AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E., ROMEIRO, A. Sustainability of nations by indices: Comparative study between environmental sustainability index, ecological footprint and the emergy performance indices. *Ecological Economics*, doi:10.1016/j.ecolecon.2007.10.023. 2005.

SICHE, J.R.; ORTEGA, E.; AGOSTINHO, F.D.R. Ecological Footprint based on emergy (EEF). International Ecological Footprint Conference 2007. Cardiff, United Kingdom. 2007.

Disponível em:

[http://www.brass.cf.ac.uk/events/International Ecological Footprint Conference.html](http://www.brass.cf.ac.uk/events/International_Ecological_Footprint_Conference.html)

Acesso: 05/11/2007.

SIMMONS, C.; LEWIS, K.; BARRETT, J. Two feet – two approaches: a component-based model of ecological footprinting. *Ecological Economics* 32(3), 375-380. 2000.

SISSINWINE, M.P. Why do fish populations vary? In: *Exploitation of marine communities* (ed. by R.M. May), pp. 59–94. Dahlem Konferenzen, Berlin Heidelberg, USA. 1984.

SMIL, V. *Cycles of Life: Civilization and Biosphere*. Scientific American Library Series Number 63, USA. 1997.

SOS Mata Atlântica; INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). *Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica*. 2008.

Disponível em: <http://www.sosmatatlantica.org.br>

Acesso em: 18/07/2008

SOUZA, A. Análise emergética do assentamento Fazenda Ipanema: reforma agrária e desenvolvimento sustentável. So89a. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas. 2006.

STÖGLEHNER, G. Ecological footprint: a tool for assessing sustainable energy supplies. J. Clean. Prod. 11, 267–277. 2003.

TANSLEY, A.G. The use and abuse of vegetational concepts and terms. Ecology, 16, 319–341. 1935.

TILMAN, D.; DOWNING, J.A. Biodiversity and stability in grasslands. Nature 367:363-365. 1994.

UNEP. United Nations Environmental Program, Convention on Biological Diversity: 2005, Indicators for Assessing Progress Towards the 2010 Target: Ecological Footprint and Related Concepts. 2005.

VAN DEN BERGH, J.C.J.M.; VERBRUGGEN, H. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the 'ecological footprint'. Ecological Economics 29(1), p. 61- 72. 1999.

VAN KOOTEN G.C.. BULTE E.H. *The Ecological Footprint: Useful Science or Politics?* Ecological Economics 32. 385-389, 2000.

VENETOULIS, J.; TALBERTH, J. Refining the Ecological Footprint. Environment Development and Sustainability. DOI 10.1007/s10668-006-9074-z. 2007.

VERHULST, P.F. Notice sur la Loi que La Population suit dans son Accroissement. Correspondance. Math. Phys. 10, 113–121. 1838.

VICTOR, P.A.; HANNA, E.; KUBURSI, A. How strong is weak sustainability? In: D. Pearce and S. Faucheux (Editors), Proc. Int. Symp. on models of sustainable development, 16-18 March 1994, Paris, pp. 93-114. 1994.

VITOUSEK, P.M.; EHRLICH, P.R.; EHRLICH, A.H.; WATSON, P.A. Human Appropriation of the Products of Photosynthesis. Bioscience, 36, 368-373. 1986.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. Our ecological footprint: reducing human impact on the Earth. 6. ed. Canada: New Society Publishers, p.160. 1996.

WACKERNAGEL, M.; REES, W. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: economics from an ecological footprint perspective. Ecol. Econ. 20 (1), 3–24. 1997.

WACKERNAGEL, M.; MONFREDA, C.; MORAN, D.; WERMER, P.; GOLDFINGER, S.; DEUMLING, D.; MURRAY, M. National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The Underlying Calculation Method, Global Footprint Network, Oakland, California. 2005.

WALKER, T.D.; VALENTINE, J.W. Equilibrium models of evolutionary species diversity and the number of empty niches. American Naturalist, 124, 887–899. 1984.

WIEDMANN, T.; LENZEN, M. On the Conversion between Local and Global Hectares in Ecological Footprint Analysis. Ecological Economic. In press. 2007.

WNA - World Nuclear Association. Nuclear Power in the World Today. Information Paper 01-2007. Disponível em: <http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>
Acesso em: 10/01/2008

WRI. World Resources 2000-2001 – People And Ecosystems: The Fraying Web of Life. Washington DC, USA. 2000.

ZHAO, S.; LI, Z.; LI, W. A Modified Method of Ecological Footprint Calculation and its Application. Ecological Modelling 185. p 65-77. 2005

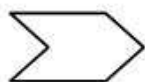
ANEXO I



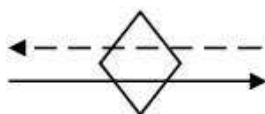
SÍMBOLOS UTILIZADOS EM DIAGRAMAS SISTÊMICOS



FLUXO DE ENERGIA: Um fluxo proporcional ao volume do estoque ou à necessidade da fonte que o produz.



INTERAÇÃO: Intersecção interativa de dois fluxos para produzir uma saída em proporção a uma função de ambos ou controle de ação de um fluxo sobre o outro.



TRANSAÇÃO: Uma unidade que indica a venda de bens ou serviços (linha contínua) em troca de um pagamento em dinheiro (linha tracejada). O reço é mostrado na figura como fonte de energia externa.



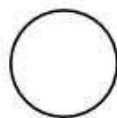
DEPÓSITO: Uma reserva energética dentro do sistema, que guarda uma quantidade de energia de acordo com o balanço de entrada e saída (variáveis de estado).



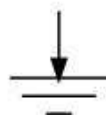
CONSUMIDOR: Unidade que transforma a qualidade de energia, armazena e retro-alimenta energia à etapa anterior (sistema autocatalítico) para melhorar o fluxo de energia que recebe.



PRODUTOR: Unidade que coleta e transforma energia de baixa qualidade (baixa intensidade) sob a ação de um fluxo de energia de alta qualidade.



FONTE: Um recurso externo que fornece energia de acordo com um programa controlado externamente (função força).



SUMIDOURO DE ENERGIA: Dispersão de energia potencial empregada no sistema. Todos os processos de interação e os armazenamentos dispersam energia.



CAIXA: Símbolo de uso múltiplo que pode ser usado para representar uma unidade de consumo e produção dentro de um sistema maior, representando assim, um subsistema.

APÊNDICE I



DEMONSTRAÇÃO DOS CÁLCULOS DA PEGADA ECOLÓGICA BASEADA NA EMERGIA

Neste apêndice são mostrados os cálculos de biocapacidade e pegada divididos por categorias, assim como as referências das transformidades e dos valores, e as considerações feitas.

Considerações:

- População do Brasil = 180.000.000 pessoas (estimativa baseada no IBGE (2004));
- População Mundial = 6.200.000.000 pessoas (estimativa baseada na ONU (2004));
- Densidade Emergética Global = $3,10E+14$ seJ/ha.ano ou $3,10E+10$ seJ/m².ano (Zhao et al. (2005));
- Considera-se que 55% da biomassa total é constituída por carbono (Ponce-Hernandez et al. (2004)).

Tabela 34: Cálculos da Biocapacidade do Brasil

Ecossistemas Naturais		
Floresta Amazônica		
Área Total =	4,20E+12 m2	[a]
Área Preservada (85,00%) =	3,57E+12 m2	[a]
Pluviosidade =	3,00E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	5,29E+19 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	1,62E+24 seJ/ano	
NPP =	0,93 kgC/m2/ano	[d]
Biomassa =	1,69 kg/m2/ano	
Energia da Biomassa = (área) x (biomassa) x (4000kcal/kg) x (4186 J/kcal)		
=	1,01E+20 J/ano	
Transformidade da Produção de Biomassa =	1,60E+04 seJ/J	
Energia por pessoa = (energia) / (população)		
=	8,99E+15 seJ/cap	
Biocapacidade = (energia por pessoa) / (DEG)		
=	28,99 gha/cap	
Mata Atlântica		
Área Total =	1,11E+12 m2	[a]
Área Preservada (27,44%) =	3,05E+11 m2	[a]
Pluviosidade =	2,50E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	3,76E+18 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	1,15E+23 seJ/ano	
NPP =	0,93 kgC/m2/ano	[d]
Biomassa =	1,69 kg/m2/ano	
Energia da Biomassa = (área) x (biomassa) x (4000kcal/kg) x (4186 J/kcal)		
=	8,62E+18 J/ano	
Transformidade da Produção de Biomassa =	1,33E+04 seJ/J	
Energia por pessoa = (energia) / (população)		
=	6,40E+14 seJ/cap	
Biocapacidade = (energia por pessoa) / (DEG)		
=	2,06 gha/cap	
Cerrado		
Área Total =	2,03E+12 m2	[a]
Área Preservada (61,10%) =	1,24E+12 m2	[a]
Pluviosidade =	2,00E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	1,23E+19 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	3,75E+23 seJ/ano	
NPP =	0,79 kgC/m2/ano	[d]
Biomassa =	1,44 kg/m2/ano	
Energia da Biomassa = (área) x (biomassa) x (4000kcal/kg) x (4186 J/kcal)		
=	2,98E+19 J/ano	
Transformidade da Produção de Biomassa =	1,26E+04 seJ/J	
Energia por pessoa = (energia) / (população)		
=	2,08E+15 seJ/cap	
Biocapacidade = (energia por pessoa) / (DEG)		
=	6,72 gha/cap	

Pantanal

Área Total =	1,50E+11 m2	[a]
Área Preservada (88,70%) =	1,33E+11 m2	[a]
Pluviosidade =	1,25E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	8,24E+17 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	2,52E+22 seJ/ano	
NPP =	1,18 kgC/m2/ano	[d]
Biomassa =	2,15 kg/m2/ano	
Energia da Biomassa = (área) x (biomassa) x (4000kcal/kg) x (4186 J/kcal)		
=	4,79E+18 J/ano	
Transformidade da Produção de Biomassa =	5,26E+03 seJ/J	
Energia por pessoa = (emergia) / (população)		
=	1,40E+14 seJ/cap	
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)		
=	0,45 gha/cap	

Pampas

Área Total =	1,76E+11 m2	[a]
Área Preservada (41,30%) =	7,29E+10 m2	[a]
Pluviosidade =	1,25E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	4,50E+17 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	1,38E+22 seJ/ano	
NPP =	0,35 kgC/m2/ano	[d]
Biomassa =	0,64 kg/m2/ano	
Energia da Biomassa = (área) x (biomassa) x (4000kcal/kg) x (4186 J/kcal)		
=	7,77E+17 J/ano	
Transformidade da Produção de Biomassa =	1,77E+04 seJ/J	
Energia por pessoa = (emergia) / (população)		
=	7,65E+13 seJ/cap	
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)		
=	0,25 gha/cap	

Caatinga

Área Total =	8,44E+11 m2	[a]
Área Preservada (62,69%) =	5,29E+11 m2	[a]
Pluviosidade =	9,00E-01 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	2,35E+18 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	7,20E+22 seJ/ano	
NPP =	0,07 kgC/m2/ano	[d]
Biomassa =	0,13 kg/m2/ano	
Energia da Biomassa = (área) x (biomassa) x (4000kcal/kg) x (4186 J/kcal)		
=	1,13E+18 J/ano	
Transformidade da Produção de Biomassa =	6,38E+04 seJ/J	
Energia por pessoa = (emergia) / (população)		
=	4,00E+14 seJ/cap	
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)		
=	1,29 gha/cap	

Zona Costeira (Plataforma Continental até 200m de profundidade)

Área Total =	6,70E+11 m2	[e]
Pluviosidade =	3,00E+00 m/ano	[f]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	9,93E+18 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	3,04E+23 seJ/ano	
NPP =	0,5344 kgC/m2/ano	[g]
Biomassa =	0,97 kg/m2/ano	
Energia da Biomassa = (área) x (biomassa) x (4000kcal/kg) x (4186 J/kcal)		
=	1,09E+19 J/ano	
Transformidade da Produção de Biomassa =	2,79E+04 seJ/J	
Energia por pessoa = (energia) / (população)		
=	1,69E+15 seJ/cap	
Biocapacidade = (energia por pessoa) / (DEG)		
=	5,45 gha/cap	

Cultivo, Pastagem e Floresta**Soja**

Área Total =	2,07E+11 m2	[h]
Pluviosidade (Cerrado) =	2,00E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	2,04E+18 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	6,25E+22 seJ/ano	
Energia por pessoa = (energia) / (população)		
=	3,47E+14 seJ/cap	
Biocapacidade = (energia por pessoa) / (DEG)		
=	1,12 gha/cap	

Cana-de-açúcar

Área Total =	7,04E+10 m2	[i]
Pluviosidade (Mata Atlântica) =	2,50E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	8,69E+17 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	2,66E+22 seJ/ano	
Energia por pessoa = (energia) / (população)		
=	1,48E+14 seJ/cap	
Biocapacidade = (energia por pessoa) / (DEG)		
=	0,48 gha/cap	

Eucalipto

Área Total =	3,50E+10 m2	[i]
Pluviosidade (Mata Atlântica) =	2,50E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	4,32E+17 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	1,32E+22 seJ/ano	
Energia por pessoa = (energia) / (população)		
=	7,35E+13 seJ/cap	
Biocapacidade = (energia por pessoa) / (DEG)		
=	0,24 gha/cap	

Frutas		
Área Total =	4,04E+08 m2	[i]
Pluviosidade (Mata Atlântica) =	2,50E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	4,99E+15 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	1,53E+20 seJ/ano	
Energia por pessoa = (emergia) / (população)		
=	8,48E+11 seJ/cap	
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)		
=	0,00 gha/cap	
Cereais e Grãos		
Área Total =	1,87E+11 m2	
Milho =	1,23E+11 m2	[i]
Arroz =	4,00E+10 m2	[i]
Trigo =	2,40E+10 m2	[i]
Pluviosidade (Mata Atlântica) =	2,50E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	2,30E+18 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	7,05E+22 seJ/ano	
Energia por pessoa = (emergia) / (população)		
=	3,92E+14 seJ/cap	
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)		
=	1,26 gha/cap	
Feijão		
Área Total =	4,00E+10 m2	[i]
Pluviosidade (Mata Atlântica) =	2,50E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	4,94E+17 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	1,51E+22 seJ/ano	
Energia por pessoa = (emergia) / (população)		
=	8,40E+13 seJ/cap	
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)		
=	0,27 gha/cap	
Algodão		
Área Total =	1,30E+10 m2	[i]
Pluviosidade (Cerrado) =	2,00E+00 m/ano	[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)		
=	1,28E+17 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	3,93E+21 seJ/ano	
Energia por pessoa = (emergia) / (população)		
=	2,18E+13 seJ/cap	
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)		
=	0,07 gha/cap	

Vegetais			
Área Total =	8,07E+09 m2		[i]
Pluviosidade (Mata Atlântica) =	2,50E+00 m/ano		[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg		
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3		
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)			
=	9,97E+16 J/ano		
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J		[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	3,05E+21 seJ/ano		
Energia por pessoa = (emergia) / (população)			
=	1,69E+13 seJ/cap		
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)			
=	0,05 gha/cap		
Pastagem			
Área Total =	1,73E+12 m2		[i]
Pluviosidade (Mata Atlântica) =	2,50E+00 m/ano		[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg		
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3		
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)			
=	2,14E+19 J/ano		
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J		[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	6,54E+23 seJ/ano		
Energia por pessoa = (emergia) / (população)			
=	3,63E+15 seJ/cap		
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)			
=	11,72 gha/cap		
Área Humana			
Urbana			
Área Total =	2,20E+10 m2		[i]
Pluviosidade (Mata Atlântica) =	2,50E+00 m/ano		[b]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg		
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3		
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)			
=	2,72E+17 J/ano		
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J		[c]
Energia do Potencial Químico da Chuva =	8,31E+21 seJ/ano		
Energia por pessoa = (emergia) / (população)			
=	4,62E+13 seJ/cap		
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)			
=	0,15 gha/cap		
Espaços Não Ocupados pelo Homem			
Áreas Congeladas			
Área Total =	1,90E+13 m2		
Ártico =	5,35E+12 m2		[e]
Antártico =	1,37E+13 m2		[e]
Pluviosidade =	6,00E-02 m/ano		[f]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg		
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3		
Potencial Químico da Chuva = (área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)			
=	5,63E+18 J/ano		
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J		[c]
Energia Global do Potencial Químico da Chuva =	1,72E+23 seJ/ano		
Energia Global por pessoa =	2,78E+13 seJ/cap		
Energia do Potencial Químico da Chuva (Brasil) = (emergia global por pessoa) x (população brasileira)			
=	5,01E+21 seJ/ano		
Biocapacidade = (emergia por pessoa) / (DEG)			
=	0,0897 gha/cap		

Desertos

Área Total =	1,37E+13 m2	
Saara =	9,07E+12 m2	[e]
Arabia =	1,30E+12 m2	[e]
Gobi =	1,13E+12 m2	[e]
Kalahari =	5,80E+11 m2	[e]
Big Desert =	4,14E+11 m2	[e]
Kara kum =	3,50E+11 m2	[e]
Taklamakan shamo =	3,44E+11 m2	[e]
Namibe =	3,10E+11 m2	[e]
Thar =	2,60E+11 m2	[e]
Pluviosidade =	3,50E-02 m/ano	[f]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva =	(área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)	
=	2,38E+18 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia Global do Potencial Químico da Chuva =	7,27E+22 seJ/ano	
Energia Global por pessoa =	1,17E+13 seJ/cap	
Energia do Potencial Químico da Chuva (Brasil) =	(energia global por pessoa) x (população brasileira)	
=	2,11E+21 seJ/cap	
Biocapacidade =	(energia por pessoa) / (DEG)	
=	0,0378 gha/cap	

Oceanos

Área Total =	3,94E+14 m2	
Atlântico =	1,06E+14 m2	[e]
Pacífico =	1,80E+14 m2	[e]
Índico =	7,40E+13 m2	[e]
Ártico =	1,30E+13 m2	[e]
Antártico =	2,03E+13 m2	[e]
Pluviosidade =	1,30E-01 m/ano	[f]
Energia Potencial Química da Chuva =	4,94E+03 J/kg	
Densidade da Água =	1,00E+03 kg/m3	
Potencial Químico da Chuva =	(área) x (pluv.) x (en. pot. quím.chuva) x (dens. água)	
=	2,53E+20 J/ano	
Transformidade =	3,06E+04 seJ/J	[c]
Energia Global do Potencial Químico da Chuva =	7,73E+24 seJ/ano	
Energia Global por pessoa =	1,25E+15 seJ/cap	
Energia do Potencial Químico da Chuva (Brasil) =	(energia global por pessoa) x (população brasileira)	
=	2,25E+23 seJ/ano	
Biocapacidade =	(energia por pessoa) / (DEG)	
=	4,0236 gha/cap	

REFERÊNCIAS:

- [a] MMA. Ministério do Meio Ambiente - Secretaria de Biodiversidade e Florestas. *Mapas de Cobertura Vegetal dos Biomas*. 2007.
Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 15/04/2008.
- [b] INPE. Ministério de Ciência e Tecnologia – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. *Precipitação Acumulada*. 2007.
Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br>. Acesso em: 15/01/2008.
- [c] BROWN, M.T.; S. ULGIATI. *Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems*. *Ecological Modeling*. Vol 78, pp 201-213, 2004.
- [d] AMTHOR, J.S.; MEMBROS DO ECOSYSTEMS WORKING GROUP. *Terrestrial Ecosystem Responses to Global Change: a research strategy*. ORNL Technical Memorandum 1998/27, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee. 37 pp. 1998.
- [e] CIA – Central Intelligence Agency. *The World Factbook*. 2008.
Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>. Acesso em: 04/02/2008.
- [f] NASA – National Aeronautics and Space Administration. *Atmospheric Science Data Center: Surface meteorology and Solar Energy: Global / Regional Data*. 2008.
Disponível em: <http://earth-www.larc.nasa.gov/>. Acesso em: 04/02/2008.
- [g] VENETOULIS, J.; TALBERTH, J. Refining the Ecological footprint. *Environment Development and Sustainability* DOI 10.1007/s10668-006-9074-z. 2007.
- [h] EMBRAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Embrapa Soja*. 2007.
Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/>. Acesso em: 10/03/2008.
- [i] IBGE. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Economia – Agropecuária*. 2007.
Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso: 15/01/2008.

Tabela 35: Cálculos da Pegada do Brasil (Dados de 2004)

Cultivos		
Soja		Referências
	Área Total = 2,07E+07 ha	[a]
	Produtividade = 2,82E+00 Mg/ha/ano	[a]
	Produção = 5,84E+07 Mg/ano	
	Energia da Produção = (produção) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 7,82E+17 J/ano	
	Energia da Produção = (energia da produção) x (transformidade)	
	= 9,15E+22 seJ/ano	
	Energia da Produção por pessoa = (energia da produção) / (população)	
	= 5,08E+14 seJ/cap	
	Importação = 0,00E+00 Mg/ano	[a]
	Energia das Importações = (importações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 0,00E+00 J/ano	
	Energia das Importações = (energia das importações) x (transformidade)	
	= 0,00E+00 seJ/ano	
	Energia das Importações por pessoa = (energia das importações) / (população)	
	= 0,00E+00 seJ/cap	
	Exportação = 3,89E+07 Mg/ano	[a]
	Energia das Exportações = (exportações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 5,21E+17 J/ano	
	Energia das Exportações = (energia das exportações) x (transformidade)	
	= 6,09E+22 seJ/ano	
	Energia das Exportações por pessoa = (energia das exportações) / (população)	
	= 3,38E+14 seJ/cap	
	Consumo = (produção) - (exportação) + (importação)	
	= 1,95E+07 Mg/ano	
	Energia do Consumo = (consumo) x (cont. energ.) x (0,80) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 2,62E+17 J/ano	
	Energia do Consumo = (energia do consumo) x (transformidade)	
	= 3,06E+22 seJ/ano	
	Energia do Consumo por pessoa = (energia do consumo) / (população)	
	= 1,70E+14 seJ/cap	
	Pegada da Produção = (energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 1,64E+00 seJ/cap	
	Pegada Importada = (energia da importação por pessoa) / (DEG)	
	= 0,00E+00 gha/cap	
	Pegada Exportada = (energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
	= 1,09E+00 gha/cap	
	Pegada Nacional = (energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 5,48E-01 gha/cap	
	Transformidade = 1,17E+05 seJ/J	[b]

Cana-de-açúcar (Açúcar e Alcool)

Área Total =	7,04E+06 ha	[c]
Produtividade =	7,41E+01 Mg/ha/ano	[c]
Produção =	4,58E+08 Mg/ano	
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 6,13E+18 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 4,90E+23 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 2,72E+15 seJ/cap	
Importação =	0,00E+00 Mg/ano	[c]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 0,00E+00 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 0,00E+00 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 0,00E+00 seJ/cap	
Exportação =	9,50E+06 Mg/ano	[c]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 1,27E+17 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 1,02E+22 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 5,65E+13 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 4,48E+08 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.) x (0,80) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 6,01E+18 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 4,80E+23 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 2,67E+15 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 8,79E+00 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia da importação por pessoa) / (DEG)	
	= 0,00E+00 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
	= 1,82E-01 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 8,60E+00 gha/cap	
Transformidade =	7,99E+04 seJ/J	[d]

Cereais e Grãos

Produção =	6,38E+07 Mg/ano	[c]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 8,55E+17 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 9,76E+22 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 5,42E+14 seJ/cap	
Importação =	9,29E+06 Mg/ano	[c]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 1,24E+17 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 1,42E+22 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 7,90E+13 seJ/cap	
Exportação =	6,82E+05 Mg/ano	[c]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 9,14E+15 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 1,04E+21 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 5,80E+12 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 7,24E+07 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.) x (0,80) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 9,70E+17 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 1,11E+23 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 6,16E+14 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 1,75E+00 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia da importação por pessoa) / (DEG)	
	= 2,55E-01 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
	= 1,87E-02 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 1,99E+00 gha/cap	
Transformidade =	1,14E+05 seJ/J	[d]

Feijão

Produção =	3,30E+06 Mg/ano	[c]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 4,42E+16 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 3,05E+22 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 1,69E+14 seJ/cap	
Importação =	1,03E+05 Mg/ano	[c]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 1,38E+15 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 9,52E+20 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 5,29E+12 seJ/cap	
Exportação =	3,20E+03 Mg/ano	[c]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 4,29E+13 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 2,96E+19 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 1,64E+11 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 3,40E+06 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.) x (0,80) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 4,55E+16 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 3,14E+22 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 1,75E+14 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 5,47E-01 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia da importação por pessoa) / (DEG)	
	= 1,71E-02 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
	= 5,30E-04 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 5,63E-01 gha/cap	
Transformidade =	6,90E+05 seJ/J	[e]

Algodão

Produção =	2,31E+06 Mg/ano	[f]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 3,09E+16 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 5,88E+22 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 3,27E+14 seJ/cap	
Importação =	6,81E+04 Mg/ano	[f]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 9,13E+14 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 1,73E+21 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 9,64E+12 seJ/cap	
Exportação =	4,89E+05 Mg/ano	[f]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 6,55E+15 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 1,24E+22 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 6,91E+13 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 1,89E+06 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.) x (0,80) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 2,53E+16 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 4,81E+22 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 2,67E+14 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 1,05E+00 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia da importação por pessoa) / (DEG)	
	= 3,11E-02 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
	= 2,23E-01 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 8,62E-01 gha/cap	
Transformidade =	1,90E+06 seJ/J	[e]

Frutas e Vegetais

Produção =	4,00E+07 Mg/ano	[c]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 5,36E+17 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 3,96E+23 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 2,20E+15 seJ/cap	
Importação =	2,30E+05 Mg/ano	[c]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 3,08E+15 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 2,28E+21 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 1,26E+13 seJ/cap	
Exportação =	8,00E+05 Mg/ano	[c]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 1,07E+16 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 7,92E+21 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 4,40E+13 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 3,94E+07 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.) x (0,80) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (4 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 5,28E+17 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 3,90E+23 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 2,17E+15 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 7,09E+00 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia da importação por pessoa) / (DEG)	
	= 4,08E-02 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
	= 1,42E-01 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 6,99E+00 gha/cap	
Transformidade =	7,39E+05 seJ/J	[d]

Floresta		
Madeira		
Área Total =	3,50E+06 ha	[c]
Produtividade =	4,00E+01 m3/ha/ano	[c]
Produção =	1,40E+08 m3/ano	
Energia da Produção =	(produção) x (conv. g/m3) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (0,5E+06 g/m3) x (3,6 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 8,44E+17 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 2,95E+22 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 1,64E+14 seJ/cap	
Importação =	0,00E+00 m3/ano	[c]
Energia das Importações =	(importações) x (conv. g/m3) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (0,5E+06 g/m3) x (3,6 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 0,00E+00 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 0,00E+00 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 0,00E+00 seJ/cap	
Exportação =	1,50E+06 m3/ano	[c]
Energia das Exportações =	(exportações) x (conv. g/m3) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (0,5E+06 g/m3) x (3,6 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 9,04E+15 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 3,16E+20 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 1,75E+12 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 1,39E+08 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (conv. g/m3) x (cont. energ.) x (m. seca) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (0,5E+06 g/m3) x (3,6 kcal/g) x (0,80) x (4186 J/kcal)	
	= 8,35E+17 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 2,91E+22 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 1,62E+14 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 5,28E-01 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia da importação por pessoa) / (DEG)	
	= 0,00E+00 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
	= 5,66E-03 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 5,22E-01 gha/cap	
Transformidade =	3,49E+04 seJ/J	[e]

Produtos Animais	
Carne	
Produção = 1,72E+07 Mg/ano	[c]
Energia da Produção = (produção) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
= (produção) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
= 7,93E+16 J/ano	
Energia da Produção = (energia da produção) x (transformidade)	
= 4,22E+23 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa = (energia da produção) / (população)	
= 2,35E+15 seJ/cap	
Importação = 3,30E+04 Mg/ano	[c]
Energia das Importações = (importações) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
= (importações) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
= 1,52E+14 J/ano	
Energia das Importações = (energia das importações) x (transformidade)	
= 8,09E+20 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa = (energia das importações) / (população)	
= 4,50E+12 seJ/cap	
Exportação = 3,24E+06 Mg/ano	[c]
Energia das Exportações = (exportações) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
= (exportações) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
= 1,49E+16 J/ano	
Energia das Exportações = (energia das exportações) x (transformidade)	
= 7,94E+22 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa = (energia das exportações) / (população)	
= 4,41E+14 seJ/cap	
Consumo = (produção) - (exportação) + (importação)	
= 1,40E+07 Mg/ano	
Energia do Consumo = (consumo) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
= (consumo) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
= 6,45E+16 J/ano	
Energia do Consumo = (energia do consumo) x (transformidade)	
= 3,44E+23 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa = (energia do consumo) / (população)	
= 1,91E+15 seJ/cap	
Pegada da Produção = (energia da produção por pessoa) / (DEG)	
= 7,57E+00 seJ/cap	
Pegada Importada = (energia da importação por pessoa) / (DEG)	
= 1,45E-02 gha/cap	
Pegada Exportada = (energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
= 1,42E+00 gha/cap	
Pegada Nacional = (energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
= 6,16E+00 gha/cap	
Transformidade = 5,33E+06 seJ/J	[e]

Leite

Produção =	2,45E+07 Mg/ano	[c]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
	= 1,13E+17 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 3,22E+23 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 1,79E+15 seJ/cap	
Importação =	7,62E+05 Mg/ano	[c]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
	= 3,51E+15 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 1,00E+22 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 5,57E+13 seJ/cap	
Exportação =	1,36E+05 Mg/ano	[c]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
	= 6,26E+14 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 1,79E+21 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 9,94E+12 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 2,51E+07 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
	= 1,16E+17 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 3,30E+23 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 1,84E+15 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 5,77E+00 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia da importação por pessoa) / (DEG)	
	= 1,80E-01 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia da exportação por pessoa) / (DEG)	
	= 3,21E-02 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 5,92E+00 gha/cap	
Transformidade =	2,86E+06 seJ/J	[e]

Peixe

Produção =	9,00E+05 Mg/ano	[c]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
	= 4,14E+15 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 1,39E+22 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 7,74E+13 seJ/cap	
Importação =	1,10E+04 Mg/ano	[c]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
	= 5,07E+13 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 1,70E+20 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 9,45E+11 seJ/cap	
Exportação =	3,30E+04 Mg/ano	[c]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
	= 1,52E+14 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 5,11E+20 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 2,84E+12 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 8,78E+05 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.) x (% proteína) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (5 kcal/g) x (0,22) x (4186 J/kcal)	
	= 4,04E+15 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 1,36E+22 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 7,55E+13 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 2,50E-01 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia das importações por pessoa) / (DEG)	
	= 3,05E-03 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia das exportações por pessoa) / (DEG)	
	= 9,15E-03 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 2,43E-01 gha/cap	
Transformidade =	3,36E+06 seJ/J	[e]

Recursos Energéticos

Carvão

Produção =	5,19E+06 Mg/ano	[g]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.)	
	= (produção) x (2,9E+10 J/Mg)	
	= 1,51E+17 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 1,01E+22 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 5,59E+13 seJ/cap	
Importação =	0,00E+00 Mg/ano	[g]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.)	
	= (importações) x (2,9E+10 J/Mg)	
	= 0,00E+00 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 0,00E+00 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 0,00E+00 seJ/cap	
Exportação =	0,00E+00 Mg/ano	[g]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.)	
	= (exportações) x (2,9E+10 J/Mg)	
	= 0,00E+00 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 0,00E+00 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 0,00E+00 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 5,19E+06 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.)	
	= (consumo) x (2,9E+10 J/Mg)	
	= 1,51E+17 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 1,01E+22 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 5,59E+13 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 1,80E-01 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia das importações por pessoa) / (DEG)	
	= 0,00E+00 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia das exportações por pessoa) / (DEG)	
	= 0,00E+00 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 1,80E-01 gha/cap	
Transformidade =	6,69E+04 seJ/J	[e]

Petróleo

Produção =	5,48E+08 barris/ano	[g]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.)	
	= (produção) x (6,1E+09 J/barril)	
	= 3,34E+18 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 2,98E+23 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 1,65E+15 seJ/cap	
Importação =	1,65E+08 barris/ano	[g]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.)	
	= (importações) x (6,1E+09 J/barril)	
	= 1,01E+18 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 8,96E+22 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 4,98E+14 seJ/cap	
Exportação =	8,82E+07 barris/ano	[g]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.)	
	= (exportações) x (6,1E+09 J/barril)	
	= 5,38E+17 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 4,79E+22 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 2,66E+14 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 6,25E+08 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.)	
	= (consumo) x (6,1E+09 J/barril)	
	= 3,81E+18 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= (consumo) x (6,1E+09 J/barril)	
Energia do Consumo por pessoa =	3,39E+23 seJ/ano	
	= (energia do consumo) / (população)	
	1,89E+15 seJ/cap	
Pegada da Produção =		
	= (energia da produção por pessoa) / (DEG)	
Pegada Importada =	5,33E+00 seJ/cap	
	= (energia das importações por pessoa) / (DEG)	
Pegada Exportada =	1,61E+00 gha/cap	
	= (energia das exportações por pessoa) / (DEG)	
Pegada Nacional =	8,59E-01 gha/cap	
	= (energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	6,08E+00 gha/cap	
Transformidade =		
	8,90E+04 seJ/J	[e]

Gás Natural

Produção =	1,70E+10 m3/ano	[g]
Energia da Produção =	(produção) x (cont. energ.) x (conv. J/kcal)	
	= (produção) x (8966 kcal/m3) x (4186 J/kcal)	
	= 6,37E+17 J/ano	
Energia da Produção =	(energia da produção) x (transformidade)	
	= 3,75E+22 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa =	(energia da produção) / (população)	
	= 2,08E+14 seJ/cap	
Importação =	8,09E+09 m3/ano	[g]
Energia das Importações =	(importações) x (cont. energ.) x (conv. J/kcal)	
	= (importações) x (8966 kcal/m3) x (4186 J/kcal)	
	= 3,03E+17 J/ano	
Energia das Importações =	(energia das importações) x (transformidade)	
	= 1,78E+22 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa =	(energia das importações) / (população)	
	= 9,91E+13 seJ/cap	
Exportação =	0,00E+00 barris/ano	[g]
Energia das Exportações =	(exportações) x (cont. energ.) x (conv. J/kcal)	
	= (exportações) x (8966 kcal/m3) x (4186 J/kcal)	
	= 0,00E+00 J/ano	
Energia das Exportações =	(energia das exportações) x (transformidade)	
	= 0,00E+00 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa =	(energia das exportações) / (população)	
	= 0,00E+00 seJ/cap	
Consumo =	(produção) - (exportação) + (importação)	
	= 2,51E+10 Mg/ano	
Energia do Consumo =	(consumo) x (cont. energ.) x (conv. J/kcal)	
	= (consumo) x (8966 kcal/m3) x (4186 J/kcal)	
	= 9,40E+17 J/ano	
Energia do Consumo =	(energia do consumo) x (transformidade)	
	= 5,53E+22 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa =	(energia do consumo) / (população)	
	= 3,07E+14 seJ/cap	
Pegada da Produção =	(energia da produção por pessoa) / (DEG)	
	= 6,71E-01 seJ/cap	
Pegada Importada =	(energia das importações por pessoa) / (DEG)	
	= 3,20E-01 gha/cap	
Pegada Exportada =	(energia das exportações por pessoa) / (DEG)	
	= 0,00E+00 gha/cap	
Pegada Nacional =	(energia do consumo por pessoa) / (DEG)	
	= 9,91E-01 gha/cap	
Transformidade =	5,88E+04 seJ/J	[h]

Hidroeletricidade

Produção =	3,21E+11 kWh/ano	[g]
Energia da Produção = (produção) x (cont. energ.)		
= (produção) x (3,6E+06 J/kWh)		
=	1,16E+18 J/ano	
Energia da Produção = (energia da produção) x (transformidade)		
=	1,28E+23 seJ/ano	
Energia da Produção por pessoa = (energia da produção) / (população)		
=	7,13E+14 seJ/cap	
Importação =	0,00E+00 kWh/ano	[g]
Energia das Importações = (importações) x (cont. energ.)		
= (importações) x (3,6E+06 J/kWh)		
=	0,00E+00 J/ano	
Energia das Importações = (energia das importações) x (transformidade)		
=	0,00E+00 seJ/ano	
Energia das Importações por pessoa = (energia das importações) / (população)		
=	0,00E+00 seJ/cap	
Exportação =	0,00E+00 barris/ano	[g]
Energia das Exportações = (exportações) x (cont. energ.)		
= (exportações) x (3,6E+06 J/kWh)		
=	0,00E+00 J/ano	
Energia das Exportações = (energia das exportações) x (transformidade)		
=	0,00E+00 seJ/ano	
Energia das Exportações por pessoa = (energia das exportações) / (população)		
=	0,00E+00 seJ/cap	
Consumo = (produção) - (exportação) + (importação)		
=	3,21E+11 Mg/ano	
Energia do Consumo = (consumo) x (cont. energ.)		
= (consumo) x (3,6E+06 J/kWh)		
=	1,16E+18 J/ano	
Energia do Consumo = (energia do consumo) x (transformidade)		
=	1,28E+23 seJ/ano	
Energia do Consumo por pessoa = (energia do consumo) / (população)		
=	7,13E+14 seJ/cap	
Pegada da Produção = (energia da produção por pessoa) / (DEG)		
=	2,30E+00 seJ/cap	
Pegada Importada = (energia das importações por pessoa) / (DEG)		
=	0,00E+00 gha/cap	
Pegada Exportada = (energia das exportações por pessoa) / (DEG)		
=	0,00E+00 gha/cap	
Pegada Nacional = (energia do consumo por pessoa) / (DEG)		
=	2,30E+00 gha/cap	
Transformidade =	1,11E+05 seJ/J	[e]

REFERÊNCIAS:

- [a] EMBRAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Embrapa Soja*. 2007.
Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/>. Acesso em: 10/03/2008.
- [b] CAVALETT, O. Análise do ciclo de vida da soja. C314a. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2008.
- [c] IBGE. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Economia – Agropecuária*. 2007.
Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso: 15/01/2008.
- [d] AGOSTINHO, F., AMBRÓSIO, L.A.; ORTEGA, E. Sob revisão. Environmental diagnosis of the agricultural systems in Mogi-Guaçu and Pardo watershed using emergy performance indices. *Journal of Environmental Management*. Article submitted in December 2007.
- [e] ODUM, H.T. *Environmental Accounting, Emergy and Decision Making*. J. Wiley, NY. 1996.
- [f] MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Dados Estatísticos – Agricultura Brasileira em Números - Anuário 2005.
Disponível em: www.agricultura.gov.br. Acesso: 15/01/2008
- [g] MME. Ministério de Minas e Energia. Publicações - Anuários. Balanço Energético Nacional – Ano Base 2004.
Disponível em: www.mme.gov.br. Acesso: 15/01/2008