

O VALOR BIOFÍSICO E O DESEMPENHO DOS SUBSISTEMAS DA MATRIZ INSUMO-PRODUTO

Elen Presotto¹ e Edson Talamini²

Resumo

O desempenho econômico de um país depende de sua estrutura produtiva que inclui o uso de recursos e insumos que tem sua origem na natureza, trabalho humano e capital, por exemplo (conhecida na literatura neoclássica como terra, capital e trabalho). Todavia ao aproximar sistemas produtivos das leis da termodinâmica a economia neoclássica não é suficiente para explicar o valor biofísico dos bens e serviços produzidos em cada setor produtivo, em sua maioria as análises neoclássicas se preocupam com a geração de valor monetário, que tem sua origem embasada nos custos de produção. A partir disso, o objetivo deste estudo é mensurar o desempenho biofísico dos trinta e quatro setores produtivos da matriz insumo-produto. Para alcançar este objetivo foi utilizada uma composição entre duas metodologias já difundidas na literatura: a matriz insumo-produto e a análise emergética. Conjuntamente são base para a construção da análise de insumo-produto emergética. A metodologia utilizada permitiu que se encontra-se os indicadores emergéticos setoriais viabilizando uma comparação entre o uso de energia e o tipo (renovável ou não-renovável) entre os diferentes setores estudados. O setor ligado ao Agronegócio, da exportação de bens primários (Setor 1- o setor da Agricultura, caça, silvicultura e pesca) é o mais renovável dentre os setores analisados.

Palavras-chaves: bioeconomia; energia; economia ecológica;

Abstract

The economic performance of a country depends on its production structure that includes the use of resources and inputs that have their origin in nature, human labor and capital, for example (known in the neoclassical literature as land, capital and labor). However, by approximating productive systems to the laws of thermodynamics, neoclassical economics is not sufficient to explain the biophysical value of the goods and services produced in each productive sector. Based on this, the objective of this study is to measure the biophysical performance of the thirty-four productive sectors of the input-output matrix. To achieve this objective, a composition between two methodologies already widespread in the literature was used: the input-output matrix and the emergy analysis. Together, they are the basis for the construction of the emergy input-output analysis. The methodology used allowed the emergy sectorial indicators to be found, enabling a comparison between energy use and type (renewable or non-renewable) among the different sectors studied. The sector linked to agribusiness, the export of primary goods (Sector 1- the Agriculture, hunting, forestry and fishing sector) is the most renewable among the sectors analyzed.

Keywords: bioeconomics; emergy; ecological economy;

JEL: O13; Q01; Q57

¹ Mestra em Economia e Desenvolvimento -UFSM, Doutoranda do PPG Agronegócios do Centro Interdisciplinar de Estudos e Pesquisas em Agronegócios - CEPAN da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

² Professor associado do Departamento de Economia e Relações Internacionais - DERI, Faculdade de Economia - FCE, e Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios – CEPAN, Programa de Pós- Graduação em Agronegócios, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Rio Grande do Sul – UFRGS. Email: edson.talamini@ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

As estratégias nacionais voltadas para o crescimento econômico e o uso de recursos da natureza, são debatidas desde os anos 70. Nesta época as crises energéticas frente a dependência econômica (ZHANG *et al.*, 2017) e a preocupação com a intensificação do uso de energia aumentaram, pois mesmo com a tecnologia, pesquisas indicam que o colapso do ecossistema poderia ser retardado até o ano de 2100 (MEADOWS *et al.*, 1972). Assim, a medida que se admite que o crescimento econômico como absorvedor de recursos naturais (insumos da natureza) é recomendável, para a condição sustentável, que a humanidade viva dentro da capacidade de carga da natureza (ZHAO; LI; LI, 2005) ou o EROI (*Energy Return On Investment*) mínimo sustentável (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009).

Cabe salientar que desde a revolução industrial, houve uma intensificação energética que continuou aumentando no processo produtivo (AUSUBEL *et al.*, 1991), assim à medida que a sociedade se desenvolve e cresce, maior é o uso de energia (DAHL, 2004). No Brasil, a intensificação energética também é observada com o aumento da produção de combustíveis fósseis, principalmente pós 1990 (BRASIL, 2018). Todavia o crescimento econômico é ecologicamente insustentável (DALY, 2004; HARDT; O'NEILL, 2017), porém, taxas negativas ou baixas podem acarretar fenômenos sociais adversos como o desemprego, ou seja, é necessário que se desenvolvam ferramentas macroeconômicas que possam ajudar a identificar alternativas ao crescimento socialmente sustentável e estabilizar o uso de material e energia dentro dos limites ecológicos (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009; HARDT; O'NEILL, 2017).

Algumas ações e políticas públicas preocupadas com a redução dos efeitos da poluição são fundamentadas na economia ambiental, com o foco na compensação da poluição da natureza (MUELLER, 1998), no uso de recursos renováveis e emissões, internalizando os custos da poluição, por exemplo. Porém, essa abordagem, de certa forma, parece incentivar à produção, mesmo que esta cause degradação ambiental e ainda traz um positivismo em demasia em investimentos verdes, que ainda estão sob forte instabilidade financeira (SVARTZMAN; DRON; ESPAGNE, 2019). Nesse sentido, entende-se que as instituições políticas podem afetar a extensão dos danos ambientais, à medida que direcionam políticas ambientais e de desenvolvimento econômico mais rígidas contra a degradação ambiental, por exemplo (CONGLETON, 1992; HASEGAWA *et al.*, 2018). Com isso, percebe-se a relação direta da influência de políticas públicas e a mitigação de impactos da degradação ambiental, segurança alimentar e o uso dos recursos no tempo.

Assim, a medida que se assume a lógica sistêmica do processo econômico é fundamental que se quantifique o uso de insumos da natureza processados, ou seja, se mensure o valor biofísico (PRESOTTO; TALAMINI, 2021). Isso porquê se o subsistema econômico se sustenta de energia e matéria de baixa entropia (Georgescu-Roegen, 1971) e a partir das leis da termodinâmica, as transformações de energia geram calor, porém parte dessa energia se dissipa no processo, ou seja, o processo é irreversível (ARTUZO *et al.*, 2021). Com isso, tanto bens de capital, como força de trabalho ou insumos da natureza não podem ser considerados constantes, há uma perda no processo produtivo inevitável (CECHIN; DA VEIGA, 2010).

Na literatura há evidências em alguns estudos que já sinalizam a importância de romper o paradigma sobre o conceito de valor em análises e incluir o valor biofísico na essência e visão original da economia ecológica (MELGAR-MELGAR; HALL, 2020; PRESOTTO; TALAMINI, 2021), definida por Georgescu-Roegen³ como “*bioeconomics*”, a junção do termo “bio” a “economia”, implica em unir a ecologia e a economia em busca do desenvolvimento sustentável, há um nível mínimo de produtividade líquida alcançável ao se explorar fontes alternativas de energia (VIVIEN *et al.*, 2019), como na também emergente economia biofísica (SHERWOOD *et al.*, 2020).

Como exemplos aplicados, citam-se os avanços em avaliar a dimensão biofísica da sustentabilidade urbana (STOSSEL; KISSINGER; MEIR, 2015); mensurar a existência de limites biofísicos para a extração de minérios (VELA-ALMEIDA; BROOKS; KOSOY, 2015); o desenvolvimento de novas metodologias como o modelo de contabilidade ambiental biofísica e “*trophodynamic*”⁴

³O termo já havia sido utilizado na década de 1920 pelo russo Baranoff (1918, 1925) para descrever a economia da pesca (VIVIEN *et al.*, 2019).

⁴Em inglês: Biophysical and Trophodynamic Environmental Accounting Model, que permite contabilizar o valor biofísico do capital natural, quanto maior for o investimento da natureza na geração do capital, maior será o seu valor biofísico.

(VASSALLO *et al.*, 2017); a discussão de modelos macroeconômicos (HARDT; O'NEILL, 2017) e a aproximação macroeconômica frente a compreensão do valor biofísicos (SVARTZMAN; DRON; ESPAGNE, 2019). Configura-se como a principal contribuição metodológica deste estudo a evolução da análise realizada por (SUN; AN, 2018) no sentido de utilizar os insumos da natureza: sol, vento e chuvas, incrementando a análise aplicada por (CHEN; CHEN, 2010) formulando indicadores emergéticos setoriais incluindo as externalidades (AGOSTINHO; PEREIRA, 2013; ALLEGRETTI, 2017) por compensação de perda de solo e emissões de CO₂.

A partir disso, a problemática deste estudo está em responder: quais os setores que possuem o melhor desempenho biofísico? Para tanto foi recorrido a duas metodologias aplicadas conjuntamente para absorver o melhor potencial de ambas: a matriz insumo-produto permite entender a dinâmica entre os insumos e os bens finais que são processados nos diferentes setores nacionais; a análise emergética tem a capacidade de mensurar todo o trabalho realizado pela natureza, capital humano e recursos da economia utilizados no processo econômico para a produção de bens (ODUM, H., 1996), o valor biofísico, sendo possível construir indicadores emergéticos de desempenho setorial.

A partir disso o objetivo deste estudo é mensurar o desempenho biofísico dos setores da economia nacional para as atividades setoriais. A importância de se apresentar os indicadores emergéticos setoriais é em função de fornecer padrões de análise que consideram o valor biofísico para a gestão sustentável de recursos disponíveis a estrutura produtiva nacional. Espera-se que os resultados mostrem as intensidades de recursos para os diferentes setores brasileiros em medidas de termos de consumo de recursos em relação à geração econômica de capital. Com isto, será possível identificar quais os setores que precisam melhorar seus indicadores para se chegar à sustentabilidade ecológica. Em especial, aos setores que envolvem a atividades agrícolas que são grandes provedores de energia ao mesmo tempo que consumidores. Visto que o Brasil exerce uma função significativa no comércio mundial de *commodities*, por exemplo (FAO, 2019).

2. METODOLOGIA

Para a construção dos indicadores de energia setoriais a partir da lógica do valor biofísico (PRESOTTO; TALAMINI, 2021), assumiu-se que o processo econômico não é fechado e que o mesmo interage com a biosfera, assim cada setor da matriz insumo-produto é considerado como um subsistema. À medida que a economia produz em seus diferentes setores, se está utilizando recursos, da natureza, humanos e de capital. Por isso, a análise emergética é fundamental para que se mensure não somente o valor monetário convencional, mas também o valor biofísico do processo de produção.

2.1 DADOS UTILIZADOS PARA A CONSTRUÇÃO DA MATRIZ EMERGÉTICA NACIONAL

Os dados que embasam a construção do vetor de energia são de diversas fontes. Os dados econômicos são embasados na matriz insumo-produto (IBGE, 2021) e os de uso de recursos naturais por setores são das contas ambientais (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012). A partir dos dados disponíveis nas duas bases e da compatibilização dos mesmos optou-se por construir os indicadores para o ano de 2009, sendo o ano mais atual disponível para a análise setorial para as contas ambientais disponível na *World Input-Output Database* (WIOD), utilizando a matriz insumo-produto efetiva do IBGE 2010 para dados econômicos, a mesma compreende um período quinquenal (cinco anos – de 01/01/2006 a 31/12/2010). Os recursos renováveis sol e vento foram calculados a partir de dados coletados no site oficial da *National Aeronautics and Space Administration-NASA* (NASA, 2020) e mensurados com base na área utilizada no setor 1 (Área arável, Área de culturas permanentes, Área de pastagens e Área florestal).

Os dados econômicos utilizados nesta pesquisa foram extraídos das Matrizes de Insumo-Produto (MIP) de 2010, originalmente são desagregadas em 67 setores, elaborada a partir das Contas Nacionais, fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020). Posteriormente, para a compatibilização de setores, os dados da MIP foram agregados em 34 setores para serem equiparados aos 34 setores das contas ambientais da WIOD, o Anexo I apresenta os 34 setores considerados.

Os dados utilizados no WIOD de contas ambientais incluem o uso de energia (primária e secundária), emissões de CO₂, uso da água (*green, blue e grey*⁵) referentes ao Brasil (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012), que são base para o cálculo dos fluxos de energia utilizados nos 34 setores. De forma mais detalhada, para o cálculo dos indicadores de energia são necessários os fluxos de energia, por vezes fatores de conversão⁶ e as transformidades, para se chegar à unidade da análise emergética (Sej- Joule de energia solar equivalente). Os dados das transformidades foram coletados em artigos e na base da *International Society for the Advancement of Energy Research* (ISAER), que disponibiliza em seu site dados compilados para a transformidade de inúmeros países e que permitem de uma forma mais ágil encontrar o dado necessário. A identificação da fonte utilizada como base para a transformidade de cada insumo e fatores de conversão, quando necessários são apresentados no Apêndice I com os detalhes de cálculos da pesquisa.

Os recursos renováveis da natureza, são: a energia do sol, vento, a água considerada verde (água da chuva). Já o fluxo de energia da natureza não renovável utilizado nos processos produtivos derivam do uso de energia primária, sendo elas: o carvão, óleo bruto, gás, água cinza e azul (UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, 2018)

Os recursos de energia secundária são considerados como serviços da economia, e se dividem em energias renováveis e não renováveis, sendo eles: o diesel, gasolina, produtos do petróleo, gás de coque, energia de uso renovável (biodiesel e outras, parcela de 30,7% renovável) (CAVALETT, 2008), eletricidade (em grande parte hidroelétrica e solar, parcela de 70% renovável) (CAVALETT, 2008) e outras energias renováveis (lenha e outras) (UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, 2018).

Os recursos econômicos, ou seja, o valor monetário considerados setorialmente são os valores de insumos intermediários, impostos e importações, que somados representam o valor bruto de produção e se dividem em materiais não renováveis e serviços como o salário (é a mão-de-obra humana parcela de 70% renovável) (ORTEGA; ANAMI; DINIZ, 2002),

As externalidades podem ser entendidas como um fato externo ao mercado de preços na relação entre consumidores e produtores, ou seja, uma externalidade está presente no mercado quando uma atividade de produção ou consumo não reflete diretamente o preço de mercado (VARIAN, 2014). Do ponto de vista ambiental a produção ou consumo pode gerar impactos nos demais agentes do ecossistema sem que se tenha que pagar por isso (ALLEGRETTI, 2017; CAVALETT, 2008).

Ao encontro da lógica de capacidade de suporte do sistema (AGOSTINHO; PEREIRA, 2013), a energia é calculada para incluir o valor das externalidades com a perda de solo e com as emissões é adicionado aos indicadores emergéticos a partir do cálculo da Área de Absorção de Impacto (AAI) conforme descrito em Allegretti (2017). O valor de AAI é a quantidade de mata nativa necessária para sequestrar as emissões do próprio processo produtivo assim como a área de floresta necessária para mitigar as perdas de solo (ALLEGRETTI, 2017; BULLER, 2016), definidos como Serviços Adicionais (SA).

A perda de solo foi calculada a partir dos dados do Setor 1, que inclui o cultivo agrícola, pecuário e florestal, a partir dos dados de áreas de tipos de produção em hectares: Área arável (considerando dados da perda de solo da produção de milho (MERTEN; MINELLA, 2013)), Área de culturas permanentes (considerando dados da perda de solo da produção de café (MERTEN; MINELLA, 2013)), Área de pastagens (considerando dados da perda de solo em área de pasto (MERTEN; MINELLA, 2013)) e Área florestal (considerando dados da perda de solo em área de floresta (MERTEN; MINELLA, 2013)). As emissões foram calculadas a partir dos valores de emissões de CO₂, dados disponíveis na WIOD (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012).

⁵O uso da água em três diferentes tipos: a água azul: refere-se ao consumo consuntivo (fica indisponível por um tempo, retorna para algum lugar, apesar de ser renovável não significa que sua disponibilidade seja ilimitada) de água superficial e subterrânea em um determinado período de tempo (HOEKSTRA *et al.*, 2011); a água verde: é o volume de água da chuva consumido, principalmente na produção agrícola (HOEKSTRA *et al.*, 2011); por último, a água cinza: é o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes com base nos padrões de qualidade da água existentes no ambiente (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012).

⁶Os fatores de conversão são apresentados no Apêndice I, que detalha os cálculos realizados para a construção do vetor de energia.

2.2 APLICAÇÃO DA ANÁLISE EMERGÉTICA PARA A CONSTRUÇÃO DO VETOR DE EMERGIA E INDICADORES SETORIAIS

Para Odum (1996), no processamento de energia há uma memória⁷ energética ou emergia incorporada que é o resultado da energia necessária e utilizada para a produção de um bem. O termo emergia pode ser definido como sendo a energia disponível e necessária, de um tipo de energia anteriormente usado, direta ou indiretamente, para produzir um recurso (serviço ou produto) (ODUM, H. T., 2007).

A análise emergética elaborada por Odum (1996) pode ser dividida em três etapas. A primeira etapa é a definição dos limites do sistema. Esse sistema é representado por diagramas, onde cada elemento como recursos, entradas ou saídas são representados de forma que se entenda perfeitamente o fluxo energético que este sistema está utilizando. A segunda busca de dados que resumem os valores de energia e de fluxos do sistema. Por fim, os fluxos e estoques em unidades de energia ou massa, são convertidos em unidades equivalentes de emergia por meio do coeficiente da transformidade (ODUM, H., 1996).

Assim a emergia total (U_T) de um processo ou produto é obtido a partir da soma dos fluxos de emergia da natureza (I) e da economia (F), matematicamente, $U_T = I + F$. A unidade de medida utilizada é emergia total é o Joule de energia solar equivalente (seJ). Quanto maior o fluxo emergético de um produto ou processo significa mais etapas envolvidas e mais emergia incorporada durante o processo, da mesma forma que na lógica de valor biofísico, quanto maior o uso de insumos (natureza, econômicos ou serviços) maior será o valor biofísico do setor analisado (PRESOTTO; TALAMINI, 2021).

Os fluxos da natureza são desmembrados em duas partes: os fluxos renováveis (R) e não renováveis (N). Já os fluxos da economia são divididos em: materiais renováveis (MR), materiais não renováveis (MN), serviços renováveis (SR), serviços não renováveis (SN) e serviços adicionais (SA), matematicamente tem-se: $I = N + R$ e $F = MR + MN + SR + SN + SA$.

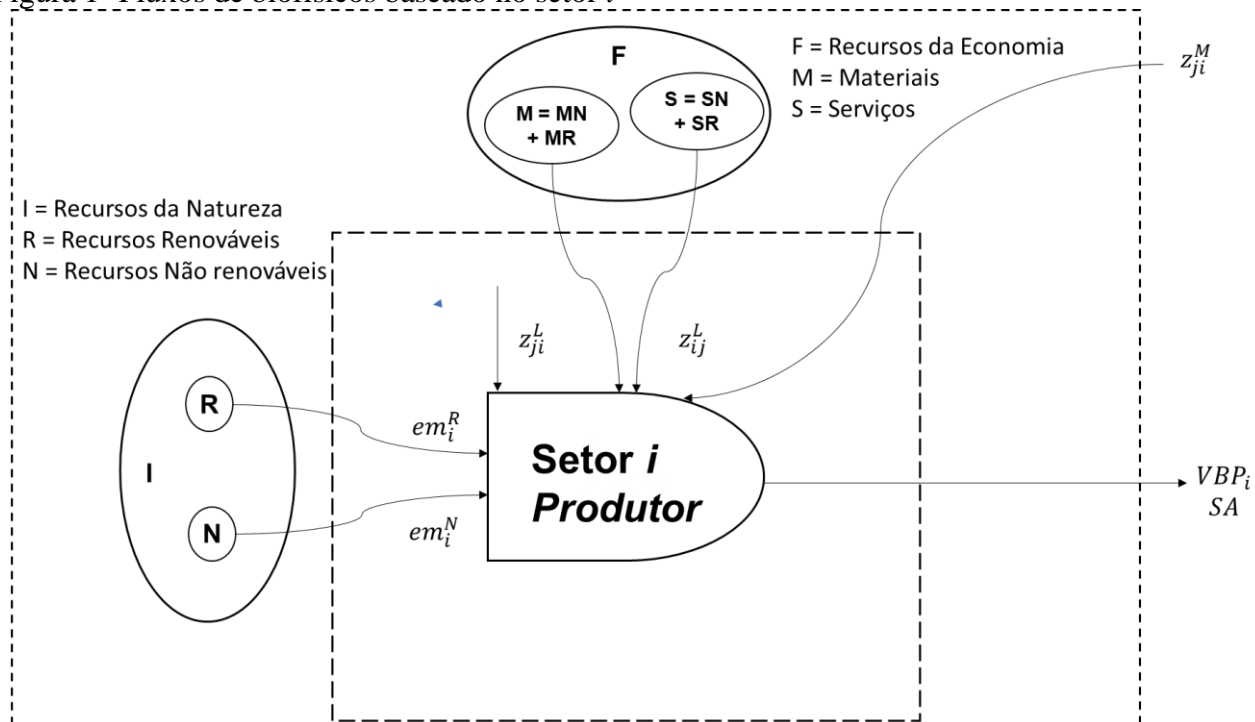
Com o uso da matriz insumo produto embasada na análise emergética é possível então mensurar indicadores já consolidados na literatura como: a Taxa de Eficiência Emergética (EYR), Taxa de Carga Ambiental (ELR*), Índice de Sustentabilidade Emergética (ESI), Índice de Insustentabilidade Emergética (EUI), Taxa de Renovabilidade (R) e o Índice de Investimento Emergético Considerando as Externalidades (EIRex) originalmente desenvolvidos em análises de sistemas por Odum (1996), Ortega; Anami; Diniz, (2002), Brown; Ulgiati (1997), (ARTUZO *et al.*, 2021), Ortega; Anami; Diniz, (2002) e Allegretti (2017) respectivamente. Neste estudo, tais indicadores são calculados setorialmente.

2.3 FORMALIZAÇÃO DOS INDICADORES EMERGÉTICOS SETORIAIS

A Figura 1, foi elaborada para direcionar as definições de limites da análise frente os fluxos de entrada e de saída de cada setor da economia brasileira a ser analisado, em função dos limites da análise que se concentram do processo econômico, ou seja, entende-se que o setor i , tem relações com os demais setores da economia e que não é isolado do resto do mundo, pois importa e exporta recursos. Em resumo, a Figura 1 retrata como o setor z_{ji}^L atende a demanda final (d_i^L) e a exportações (e_i) a partir do uso de recursos da natureza sendo: renováveis (em_i^R), não renováveis (em_i^N) e recursos importados intermediários z_{ji}^M e também utilizando recursos dos demais setores (z_{ij}^L).

⁷ Convencionou-se em utilizar o termo emergia com M, por estar ligado com o trabalho realizado pela natureza na geração de produtos e serviços, também é utilizado como um sinônimo de "energia incorporada" ou de "memória energética" (do inglês *embodied energy*) (ODUM, 1996).

Figura 1- Fluxos de biofísicos baseado no setor i



Fonte: elaborado pelos autores

A Figura 1 resume os fluxos biofísicos que são utilizados em cada setor da economia de um país, as setas indicam o fluxo de entrada e saída no setor i , a linha pontilhada resulta da ideia de que o setor recebe insumos e que a economia é parte de um todo. As variáveis de entrada resumem-se em: em_i^R mensura a energia renovável de entrada do setor i (MR); em_i^N a energia não-renovável de entrada do setor i (MN). A entrada industrial importada do setor j para o setor i (z_{ji}^M) e os bens intermediários locais do setor j para o setor i (z_{ij}^L), é quantidade de insumos intermediários que o setor i utiliza dos j setores.

Como resultado do processo econômico, frente a quantidade de insumos utilizados no setor i pela lógica da oferta, é o VBP_i , valor bruto de produção (que inclui as importações, remunerações e insumos intermediários). O Quadro 1 abrange os fluxos biofísicos primários em termos de fluxos de uso de energia, saída de emissões e recursos utilizados dentro do sistema econômico. Em resumo a Quadro 1, apresenta a estrutura para análise macroeconômica, onde a análise emergética, é utilizada para construir o vetor emergético U_T , por fora da estrutura tradicional. Cabe salientar, que a contabilidade emergética expressa, em uma visão holística, os custos ecológicos de insumos diretos e indiretos necessários para produzir os bens e serviços (ODUM, H., 1996). Porém, as abordagens macroeconômicas, exigem uma vasta disponibilidade de dados e a falta das transformidades dos mesmos, faz com que as pesquisas macroeconômicas sejam feitas em um ritmo mais lento (SUN; AN, 2018).

Quadro 1 – Estrutura genérica da Matriz Emergética de Insumo-Produto

Tipos de recursos	Variáveis	Uso do recurso	Variável Emergética	Vendas/Produto → Compras/Insumo ↓	Uso Intermediário				Demanda Final			Demanda total (Y)
					Setor 1	Setor 2	...	Setor n	Consumo	Investimento	Exportação	
Fluxos de Emergia da Economia (F)	Entrada industrial local	Uso industrial local	MN^L	Setor 1	z_{11}^L	z_{12}^L	...	z_{1n}^L		d_1^L	e_1	y_1
				Setor 2	z_{21}^L	z_{22}^L	..	z_{2n}^L		d_2^L	e_2	y_2
				---
				Setor n	z_{n1}^M	z_{n2}^L	...	z_{nn}^M		d_n^L	e_n	y_n
	Entrada industrial importada	Entrada de importação industrial	MN^M	Setor 1	z_{11}^M	z_{12}^L	...	z_{1n}^M		d_1^M		
				Setor 2	z_{21}^M	z_{22}^L	..	z_{2n}^M		d_2^M		
					
	Entrada não industrial	Valor Adicionado	$SR + SN$	Salários	v_1^R	v_1^R	...	v_n^N				
			MN^L	impostos, excedentes, etc	v_1^N	v_2^N	...	v_n^N				
	VBP	Valor Bruto de Produção	$MN = MN^L + MN^M - SR - SN$	MN	...	...	...	...
Fluxo de Emergia da Natureza (I)	Compensação	Externalidades	SA	Perda de solo	em_{1i}^{AS}	...	...	...	
				Emissões	em_{2i}^{AS}	...	...	em_n^{AS}				
	Entrada local	Insumos ambientais locais	N	recursos não-renováveis	em_1^N	em_2^N	..	em_n^N				
			R	recursos renováveis	em_1^R	em_2^R	...	em_n^R				
Total de Emergia (U_T)			$I + F$	Valor biofísico	U_1	U_2	...	U_n				

Fonte: elaborada pelos autores

(I)=contribuições da natureza; (R)=recursos renováveis; (N)=recursos não-renováveis; (SA)=serviços adicionais;

(F)=contribuições da economia; (MN)=material não renovável; (MR)=material renovável; (SR)=serviços econômicos renováveis; (SN)=serviços econômicos não renováveis;

Depois de construído o vetor de energia (última linha do Quadro 1), pode-se calcular os índices de energia para apresentar os diferentes aspectos da sustentabilidade dos diferentes setores da economia nacional. Os índices são definidos nas Equações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 descritos na sequência sendo aplicados para setores, ou seja, no subsistema econômico o indicador é construído e adaptado para analisar cada um dos 34 setores.

A Equação 1 define a Taxa de eficiência Emergética, *Emergy Yield Ratio (EYR)*, mede a eficiência da exploração de recursos, ou seja, mensura a habilidade do sistema em explorar e tornar disponível (na forma de bens e serviços) recursos da natureza através de recursos da economia. Neste estudo considerando-se a parcela de SA em U_i . Quanto maior o valor de EYR^* , mais eficiente é o setor: mais produtos serão produzidos por unidade de insumo da economia. O EYR^* próximo a 1 significa que o sistema consome tanta energia quanto a que disponibiliza para a economia, é menos eficiente ou competitivo, quanto maior for o EYR maior é a dependência da atividade produtiva de recursos da economia e sua capacidade de incorporar contribuições da natureza, conforme demonstrado na fórmula a seguir:

$$EYR^*_i = \frac{U_i}{(F)} \quad (1)$$

A Taxa de Carga Ambiental, *Environmental Loading Ratio (ELR*)*, definida pela Equação 2, mensura a pressão ecológica da produção sobre o meio ambiente, ela representa a razão entre os recursos não renováveis (N) sobre os renováveis (R), quanto maior o valor do ELR^* , maior a pressão que o sistema econômico exerce sobre o ambiente natural, esse indicador foi desenvolvido por (ORTEGA; ANAMI; DINIZ, 2002) se diferenciando do tradicional indicador ELR. Brown e Ulgiati (2004) estabeleceram um padrão de análise, a partir de estudos aplicados, que ELR^* menor que 2 indica baixos impactos ambientais, ELR^* entre 3 e 10 impactos moderados e ELR^* maior que 10 relaciona-se com altos impactos ambientais em função dos grandes fluxos de energia não renováveis.

$$ELR^*_i = \frac{(M_N + S_N + N)}{(M_R + S_R + R)} \quad (2)$$

A Equação 3, define o índice de sustentabilidade emergética *Emergy Sustainability Index (ESI)* e indica a contribuição potencial de um recurso ou produção para a economia por unidade de carga ambiental.

$$ESI_i = \frac{EYR^*_i}{ELR^*_i} \quad (3)$$

A Taxa de Renovabilidade, *Renewability Ratio (R*)*, definida pela Equação 4, representa a porcentagem de energia renovável na produção total de energia no setor i . Este indicador mede a sustentabilidade de longo prazo de uma economia ou processo de produção, uma vez que a energia não renovável será esgotada a longo prazo e a energia renovável será a única fonte de apoio à economia.

$$R^*_i = \frac{100(R + M_R + S_R)}{U_T} \quad (4)$$

O Índice de insustentabilidade Emergética (*EUI*), definida pela Equação 5, avalia a relação entre a carga ambiental gerada pelo uso de recursos não renováveis e sua eficiência emergética do uso de recursos não renováveis adquiridos. O *EUI* mensura a insustentabilidade, onde os maiores valores associados com produções mais insustentáveis.

$$EUI = \frac{ELR^*_i}{EYR^*_i} \quad (5)$$

O indicador *EIRex* é o Índice de Investimento Emergético Considerando as Externalidades (EIRex). Este índice, avalia este índice avalia a proporção de recursos da economia (investimento monetário) incluindo o valor das externalidades frente aos recursos naturais. Mede o investimento da sociedade para produzir certo bem, em relação à contribuição da natureza. Quanto maior o fluxo derivado da economia, maior a taxa de investimento emergético.

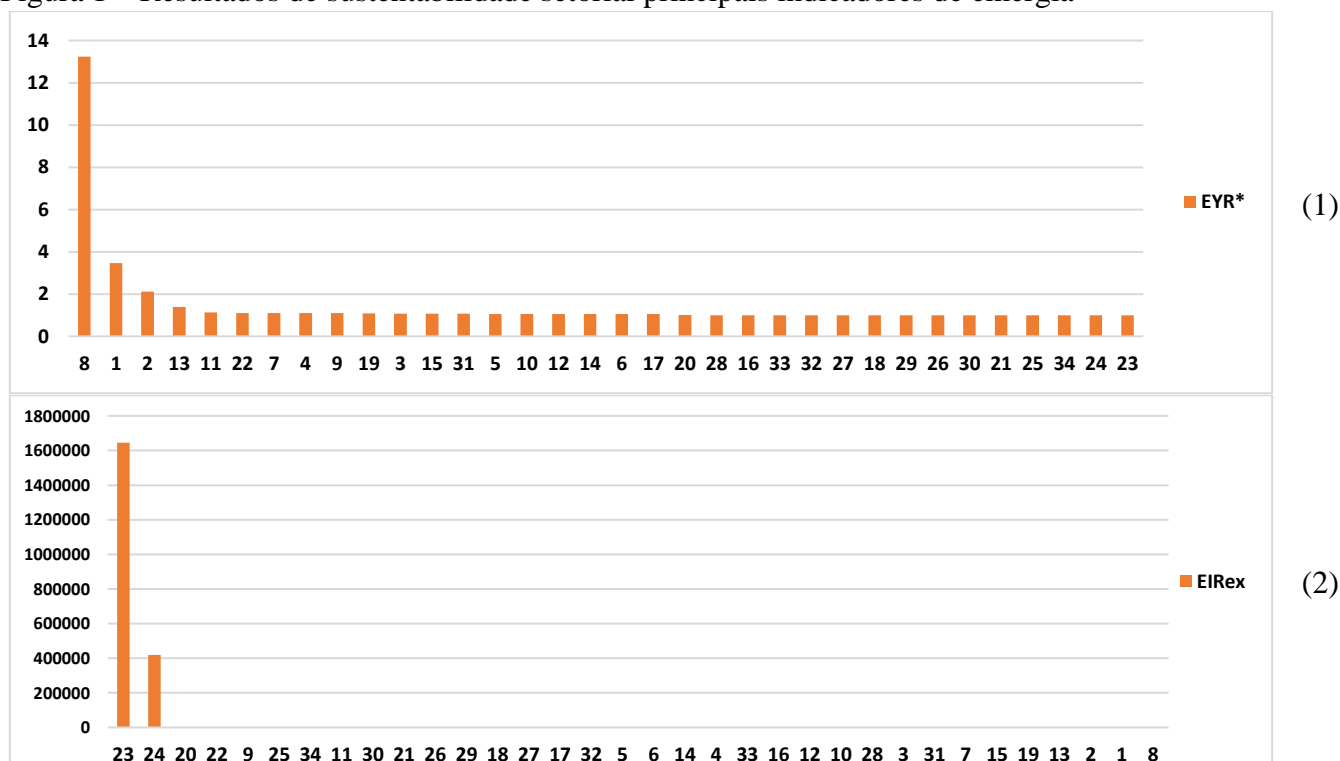
$$EIRex = \frac{(M_N + S_N + SA)}{(R + N + S_R + M_R)} \quad (6)$$

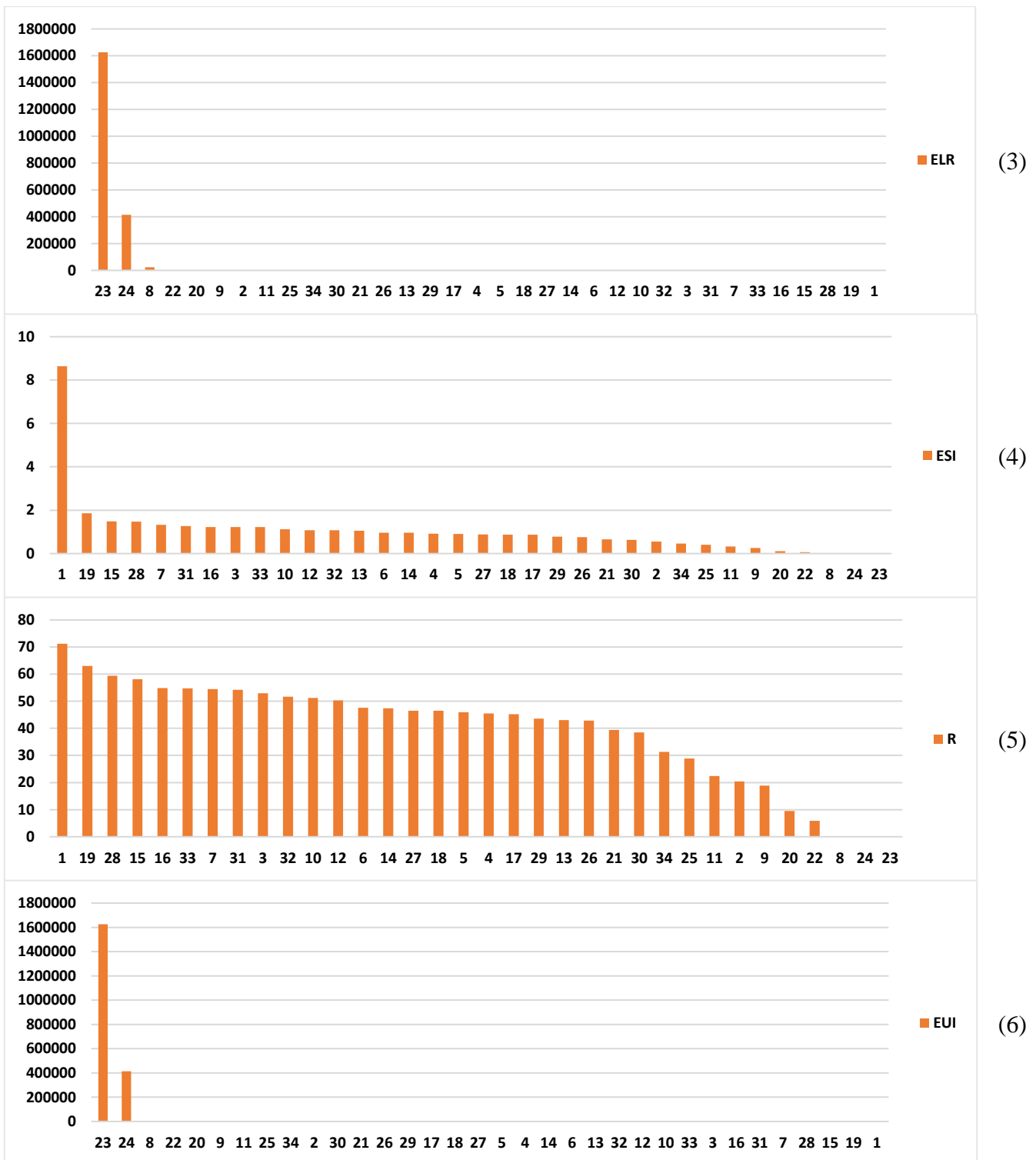
Assim, a partir da estrutura da matriz insumo-produto como base foi para calcular o vetor de energia setorial. O Apêndice I detalha dados utilizados em cada uma das fontes de insumos utilizadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos indicadores emergéticos referem-se aos 34 subsistemas das atividades produtivas setoriais e são apresentados da sequência na Figura 1. O primeiro indicador é o EYR* mensura a capacidade do sistema de explorar os recursos naturais por meio de um investimento de recursos externos do sistema econômico e reflete a contribuição potencial do processo para a economia principal. Se o EYR for igual a 1 o sistema consome tanta energia quanto a que disponibiliza à economia (se maior que 1 possui saldo positivo de energia investida). Os resultados permitem entender que a Indústria de refino (Setor 8) tem o maior indicador de EYR, seguida pelos Setores 1 e 2 Agricultura, caça, silvicultura e pesca e Indústrias extrativas, respectivamente.

Figura 1 – Resultados de sustentabilidade setorial principais indicadores de energia





Fonte: calculados pelo estudo.

O indicador EIRex mensura a proporção de recursos da economia (investimento monetário) frente aos recursos naturais incluindo as externalidades que por vezes não são valorados pela lógica de formação de preços do sistema monetário. Os maiores indicadores estão nos setores: Transporte de Marítimo (Setor 23), Transporte Aéreo (Setor 24) e Construção (Setor 20) estes setores se destacam por ter recursos utilizados da economia maior do que a proporção de energia que alimenta o setor econômico em relação às entradas de energia do ambiente. Assim, esses setores disponibilizam mais energia líquida ao processo produtivo nacional do que os demais setores. Semelhante ao EIRex, o indicador ELR avalia a pressão causada no ecossistema pelo sistema produtivo em estudo, assim quando maior o indicador maior a pressão, os maiores índices são dos setores: Transporte de marítimo (Setor 23), Transporte aéreo (Setor 24) e Industria de refino (Setor 8).

Ao contrário dos resultados encontrados até aqui, quando se mensura a sustentabilidade dos subsistemas produtivos analisados, a posição dos setores se altera. Proporcionalmente, comparado aos demais setores, percebe-se que os setores com maiores indicadores são muito mais elevados do que os demais. O indicador ESI, mede a contribuição do processo para a economia por unidade de carga ambiental. Para o ESI o menor valor possível tende a zero e o limite superior teórico (tende ao infinito), isso porque é possível somente para ecossistemas maduros e intocados (BROWN, Mark T.; ULGIATI, 2004; CAVALETT, 2008). Quanto maior seu valor, mais sustentável é o sistema assim o setor da Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1), Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19) e Equipamento de transporte (Setor 15), são os subsistemas mais sustentáveis dentre os analisados. O Setor 1, que representa em grande parte o que é produzido pelo Agronegócio brasileiro, também possui o melhor indicador de renovabilidade, que mensura a autonomia ou sustentabilidade do processo, os sistemas com maior indicador R são: Agricultura, caça, silvicultura e pesca (Setor 1), Fornecimento de eletricidade, gás e água (Setor 19) e Intermediações Financeiras (Setor 28).

Da mesma forma que os resultados encontrados, está claro que alguns sistemas de produção o mínimo EROI aceitável (HALL; BALOGH; MURPHY, 2009) a nível de investimento energético não será necessariamente o EROI mais sustentável (PRESOTTO *et al.*, 2021). Ao contrário do que uma visão tradicional da economia em que prevalece somente o valor monetário, as análises que mensuram o valor biofísico permitem mensurar o processo produtivo de forma sistêmica incorporando a análise os insumos da natureza e as externalidades do processo produtivo (PRESOTTO; TALAMINI, 2021). O que permite aproximar minimamente o processo produtivo das leis da termodinâmica, em que energia e matéria se transformam, nada se cria em função da irreversibilidade do processo (ARTUZO *et al.*, 2021).

Se por um lado o setor relacionados com transportes (geração de combustíveis) pode ser estratégico para o crescimento econômico (LIU, 2018; ZAIDI; GMIDEN; SAIDI, 2018) também é o mais competitivo, com o maior retorno de investimento EYR (Industria de refino (Setor 8), por outro possui um indicador EUI maior. Os setores de Transporte de marítimo (Setor 23), Transporte aéreo (Setor 24) tem indicadores de EUI significativamente muito maiores do que os demais setores e atividades produtivas, com exceção do Agronegócio (Setor 1), que possui destaque no indicador e EYR* e com o menor EUI (índice de insustentabilidade). Ao contrário disso, quando se está analisando a sustentabilidade das atividades produtivas ligadas ao Agronegócio como a produção de grãos Setor 1, são mais sustentáveis e com maior indicador de renovabilidade e níveis significativamente muito maiores que os setores citados anteriormente.

Os resultados encontrados sugerem que a relação entre crescimento econômico e sustentabilidade devem ser analisadas de forma sistêmica, isso porque o uso de energia e a dependência do crescimento econômico (EYR*) por setores menos sustentáveis podem afetar o uso de recursos disponíveis e com isso toda a estrutura produtiva ao longo do tempo (ESI), no longo prazo ou em relação a insustentabilidade (EUI). Cabe salientar a importância do Agronegócio no Brasil, o mesmo possui uma parcela significativa no PIB nacional (CEPEA, 2021), o que permite dizer que o Agronegócio é um setor produtivo ligado a geração de emprego e renda e ainda é um indutor do crescimento econômico e sustentável. Todavia é importante salientar a visão de desenvolvimento sustentável (DALY, 2004) somadas as leis da termodinâmica devem ser o norte de políticas públicas e a sustentabilidade no longo prazo.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo integrou-se a análise setorial da matriz insumo-produto e a análise emergética, como um esforço de aproximar a macroeconomia da economia ecológica ou biofísica. Os indicadores são eficientes em apresentar o desempenho das atividades produtivas e com isso entender a participação de cada setor frente a utilização do valor biofísico tanto pela ótica da eficiência ou competitividade como da sustentabilidade. Cabe salientar que foram considerados a perda de solo e as emissões como externalidades por compensação em todos os setores, mesmo sendo acrescidas essas externalidades o Agronegócio é o setor mais sustentável do que as demais atividades produtivas em análise e é responsável pela segurança alimentar, por ser um destaque mundial na comercialização de grão e complexo carnes. Algumas dessas

atividades podem estar ajudando substancialmente na desproporcionalidade nos indicadores de insustentabilidade dos setores ligados aos transportes e refino, por exemplo.

Os resultados são significativos em primeiro lugar pela diferença significativa entre as intensidades dos indicadores de energia encontradas nos setores analisados, isso implica em empregar esforços para desenvolver tecnologias para que setores mais insustentáveis tornem-se mais eficientes. Em segundo lugar pelo desenvolvimento de um banco de dados que representam a incorporação setorial de recursos naturais e externalidades, discussão essencial no contexto de sistemas produtivos e na economia ecológica. A análise pode apontar fortes ligações entre algumas atividades produtivas e a degradação do ecossistema (insustentabilidade).

Todavia para trabalhos futuros mais estudos são necessários para que se possa analisar os custos ecológicos das atividades de produção ao longo de toda a cadeia produtiva e que auxiliem de forma complementar os indicadores mensurados por este trabalho. Assim, de forma mais robusta será possível identificar além dos setores que precisam melhorar a sua intensidade emergética via aumento de sustentabilidade, mas também quais atividades produtivas isso terá um impacto mais significativo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a contribuição da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) para bolsa de doutorado (número do processo 88882.439350/2019-01). Agradecemos aos membros do Grupo de Pesquisa em Bioeconomia Aplicada ao Agronegócio (NEB-Agro) pelas discussões, ao Professor Dr. Marco Antonio Montoya e a Dra Gabriela Allegretti pelo conhecimento compartilhado.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, F.; PEREIRA, L. Support area as an indicator of environmental load: Comparison between Embodied Energy, Ecological Footprint, and Emergy Accounting methods. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 24, p. 494–503, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.006>
- ALLEGRETTI, G. **INSECT AS FEED: UMA ANÁLISE BIOECONÔMICA DO USO DE INSETOS COMO FONTE PROTEICA ALTERNATIVA À AVICULTURA DE CORTE BRASILEIRA**. PORTO. 1-177 f. 2017. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL CENTRO, [s. l.], 2017.
- ARTUZO, F. D. *et al.* Science of the Total Environment Emergy unsustainability index for agricultural systems assessment : A proposal based on the laws of thermodynamics. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 759, p. 1–13, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143524>
- BRASIL, (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanco Energético Nacional**. [S. l.], 2018. Available at: ben.epe.gov.br. Acesso em: 22 dez. 2018.
- BROWN, M.; BARDI, E. Folio #3 Emergy of Ecosystems. *In*: HANDBOOK OF EMERGY EVALUATION. Gainesville: [s. n.], 2001. *E-book*.
- BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: Monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 1–2, p. 51–69, 1997. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00033-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00033-5)
- BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy Analysis and Environmental Accounting. **Encyclopedia of Energy**, [s. l.], v. 2, p. 329–354, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1016/b0-12-176480-x/00242-4>
- BULLER, L. S. **DIAGNÓSTICO EMERGÉTICO DAS MUDANÇAS DE USO DA TERRA E PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO DE UMA ÁREA DO CERRADO**. 1689-1699 f. 2016. - Universidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2016. Available at: <https://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/tese-SeleneBuller.pdf>
- CAVALETT, O. **Análise do Ciclo de Vida da Soja**. 245 f. 2008. - UNICAMP, [s. l.], 2008.

CECHIN, A. D.; DA VEIGA, J. E. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. **Revista de Economia Política**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 438–454, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1590/S0101-31572010000300005>

CEPEA, (Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada). **IMPULSIONADO POR RAMO AGRÍCOLA, PIB DO AGRONEGÓCIO CRESCE 5,35% NO 1º TRIMESTRE DE 2021**.

Piracicaba: [s. n.], 2021. Available at: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>.

CHEN, G. Q.; CHEN, Z. M. Carbon emissions and resources use by Chinese economy 2007: A 135-sector inventory and input-output embodiment. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, [s. l.], v. 15, n. 11, p. 3647–3732, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.12.024>

CONGLETON, R. D. Political institutions and pollution control. **Review of Economics & Statistics**, [s. l.], v. 74, n. 3, p. 412–421, 1992. Available at: <https://doi.org/10.2307/2109485>

DALY, H. E. Crescimento sustentável? Não, obrigado. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 197–202, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2004000200012>. Acesso em: 14 jun. 2019.

FAO. **FAOSTAT**. [S. l.], 2019. Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 17 jun. 2019.

GENTY, A.; ARTO, I.; NEUWAHL, F. **FINAL DATABASE OF ENVIRONMENTAL SATELLITE ACCOUNTS: TECHNICAL REPORT ON THEIR COMPILATION**. [S. l.: s. n.], 2012. Available at: http://www.wiod.org/publications/source_docs/Environmental_Sources.pdf. Acesso em: 16 ago. 2019.

HALL, C. . S.; BALOGH, S.; MURPHY, D. J. R. What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? **Energies**, [s. l.], v. 2, p. 25–47, 2009. Available at: <https://doi.org/10.3390/en20100025>

HARDT, L.; O'NEILL, D. W. Ecological Macroeconomic Models: Assessing Current Developments. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 134, p. 198–211, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.12.027>

HASEGAWA, T. *et al.* Risk of increased food insecurity under stringent global climate change mitigation policy. **Nature Climate Change**, [s. l.], v. 8, n. 8, p. 699–703, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0230-x>. Acesso em: 24 ago. 2019.

HOEKSTRA, A. Y. *et al.* Manual de Avaliação da Pegada Hídrica. **Water Footprint Network**, [s. l.], p. 216, 2011.

IBGE, (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. [S. l.], 2021. Available at: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html. Acesso em: 21 set. 2020.

IBGE. **Matriz de Insumo-Produto**. [S. l.], 2020. Available at: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html?=&t=o-que-e>.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Contas Nacionais n. 62. Matriz de Insumo Produto 2010**. [S. l.], 2020.

LIU, X. Aggregate and disaggregate analysis on energy consumption and economic growth nexus in China. **Environmental Science and Pollution Research**, Verlag, v. 25, n. 26, p. 26512–26526, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2699-2>. Acesso em: 26 nov. 2018.

MEADOWS, D. H. *et al.* **The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome (1972)**. [S. l.: s. n.],

1972. Available at: <http://www.ask-force.org/web/Global-Warming/Meadows-Limits-to-Growth-Short-1972.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2019.

MELGAR-MELGAR, R. E.; HALL, C. A. S. Why ecological economics needs to return to its roots: The biophysical foundation of socio-economic systems. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 169, n. November 2019, p. 106567, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106567>

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture : Soil erosion scenarios. **International soil and water conservation research**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 37–48, 2013. Available at: [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30029-0](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30029-0)

MUELLER, C. **Avaliação de duas correntes da economia ambiental: escola neoclássica e a economia da sobrevivência**. [S. l.: s. n.], 1998.

NASA, L. R. C. **Prediction Of Worldwide Energy Resources, POWER**. [S. l.], 2020. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/>. Acesso em: 22 abr. 2020.

ODUM, H. **Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making**. New York: [s. n.], 1996.

ODUM, H. T. Environment, power, and society for the twenty-first century: the hierarchy of energy. **Choice Reviews Online**, Gainesville, v. 45, n. 4, p. 45-1996-45–1996, 2007. Available at: <https://doi.org/10.5860/choice.45-1996>

ODUM, H. T. Folio #2 Emergy of global processes. *In*: HANDBOOK OF EMERGY EVALUATION. Gainesville: [s. n.], 2000. p. 1–40. *E-book*.

ORTEGA, E. *et al.* Brazilian soybean production: Emergy analysis with an expanded scope. **Bulletin of Science, Technology and Society**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 323–334, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1177/0270467605278367>

ORTEGA, E.; ANAMI, M. H.; DINIZ, G. Certification of food products using emergy analysis. *In*: , 2002, Venere, Italy. **Proceedings of III International Workshop Advances in Energy Studies**. Venere, Italy: [s. n.], 2002. p. 227–237.

PESSOA, S. G.; MARTINS, M. A. Sequestro De Carbono Em Região De Cerrado Em Mato Grosso: Contribuição Para O Equilíbrio Do Clima. **Connection Line - Revista Eletrônica Do Univag**, [s. l.], v. 0, n. 12, p. 2–17, 2015. Available at: <https://doi.org/10.18312/1980-7341.n12.2015.213>

PRESOTTO, E. *et al.* Energy Efficiency, Monetary Costs, and Sustainability of Brazilian Rainfed and Irrigated Rice Cropping Systems. **Biophysical Economics and Sustainability**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 7, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41247-021-00089-4>

PRESOTTO, E.; TALAMINI, E. A PROPOSIÇÃO DO MODELO DE INSUMO-PRODUTO EMERGÉTICO COMO FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS SUSTENTÁVEIS. *In*: POLÍTICAS PÚBLICAS NO BRASIL: FERRAMENTAS ESSENCIAIS AO DESENVOLVIMENTO (EM ELABORAÇÃO). Porto Alegre: EDIPUCRS, 2021.

RUGANI, B. *et al.* Ecological deficit and use of natural capital in Luxembourg from 1995 to 2009. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 468–469, p. 292–301, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.122>

SHERWOOD, J. *et al.* Putting the Biophysical (Back) in Economics : A Taxonomic Review of Modeling the Earth - Bound Economy. **Biophysical Economics and Sustainability**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1–20, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1007/s41247-020-00069-0>

SILVEIRA, P. Estimativa Da Biomassa E Carbono Acima Do Solo Em Um Fragmento De Floresta Ombrófila Densa Utilizando O Método Da Derivação Do Volume Comercial. **Floresta**, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 789–800, 2010. Available at: <https://doi.org/10.5380/rev.v40i4.20330>

STOSSEL, Z.; KISSINGER, M.; MEIR, A. Measuring the biophysical dimension of urban sustainability. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 120, p. 153–163, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.10.010>

SUN, X.; AN, H. Emery network analysis of Chinese sectoral ecological sustainability. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 174, p. 548–559, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.228>

SVARTZMAN, R.; DRON, D.; ESPAGNE, E. From ecological macroeconomics to a theory of endogenous money for a finite planet. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 162, n. June 2018, p. 108–120, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.04.018>

UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION, (IRES). **International Recommendations for Energy Statistics**. New York: [s. n.], 2018. *E-book*.

VASSALLO, P. *et al.* Assessing the value of natural capital in marine protected areas: A biophysical and trophodynamic environmental accounting model. **Ecological Modelling**, [s. l.], v. 355, p. 12–17, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.03.013>

VELA-ALMEIDA, D.; BROOKS, G.; KOSOY, N. Setting the limits to extraction: A biophysical approach to mining activities. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 119, p. 189–196, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.001>

VIVIEN, F. D. *et al.* The Hijacking of the Bioeconomy. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 159, n. January, p. 189–197, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.01.027>

ZAIDI, S.; GMIDEN, S.; SAIDI, K. How energy consumption affects economic development in select African countries. **Quality & Quantity**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 501–513, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11135-017-0480-0>. Acesso em: 2 dez. 2018.

ZHANG, L. X. *et al.* Emery based resource intensities of industry sectors in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 142, p. 829–836, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.063>

ZHAO, S.; LI, Z.; LI, W. A modified method of ecological footprint calculation and its application. **Ecological Modelling**, [s. l.], v. 185, n. 1, p. 65–75, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.11.016>. Acesso em: 19 set. 2019.

ZHOU, S. Y.; ZHANG, B.; CAI, Z. F. Emery analysis of a farm biogas project in China: A biophysical perspective of agricultural ecological engineering. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 1408–1418, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.06.001>

Anexo I – Estrutura que define a Compatibilização de setores entre os dados da WIOD e MIP2010

Id	Denominação Utilizada	Cód. WIOD	Setores WIOD	Cód. MIP	SETORES MIP 2010
s1	Agricultura, Caça, Silvicultura e Pesca	AtB	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing	1	0191 Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita
				2	0192 Pecuária, inclusive o apoio à pecuária
				3	0280 Produção florestal; pesca e aquicultura
s2	Indústrias extrativas	C	Mining and Quarrying	4	0580 Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos
				5	0680 Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio
				6	0791 Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração
				7	0792 Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos
s3	Alimentos, Bebidas e Tabaco	15t16	Food, Beverages and Tobacco	8	1091 Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca
				9	1092 Fabricação e refino de açúcar
				10	1093 Outros produtos alimentares
				11	1100 Fabricação de bebidas
				12	1200 Fabricação de produtos do fumo
s4		17t18	Textiles and Textile Products	13	1300 Fabricação de produtos têxteis

	Têxteis e produtos têxteis			14	1400 Confeção de artefatos do vestuário e acessórios
S5	Couro, Couro e Calçado	19	Leather, Leather and Footwear	15	1500 Fabricação de calçados e de artefatos de couro
S6	Madeira e produtos de madeira e cortiça	20	Wood and Products of Wood and Cork	16	1600 Fabricação de produtos da madeira
S7	Celulose, Papel, Papel, Impressão e Publicação	21t22	Pulp, Paper, Paper , Printing and Publishing	17	1700 Fabricação de celulose, papel e produtos de papel
				18	1800 Impressão e reprodução de gravações
S8	Industria de Refino	23	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel	19	1991 Refino de petróleo e coquerias
				20	1992 Fabricação de biocombustíveis
S9	Químicos e produtos químicos	24	Chemicals and Chemical Products	21	2091 Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros
				22	2092 Fabricação de defensivos, desinfetantes, tintas e químicos diversos
				23	2093 Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal
				24	2100 Fabricação de produtos farmoquímicos e farmacêuticos
s10	Borracha e plásticos	25	Rubber and Plastics	25	2200 Fabricação de produtos de borracha e de material plástico
s11	Outro mineral não metálico	26	Other Non-Metallic Mineral	26	2300 Fabricação de produtos de minerais não-metálicos
s12	Produção de ferro e Metalurgia	29	Machinery, Nec	27	2491 Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura
				28	2492 Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais
s13	Fabricação de produtos com metais básicos	27t28	Basic Metals and Fabricated Metal	29	2500 Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos
s14	Equipamento Eletrônicos e Ótico	30t33	Electrical and Optical Equipment	30	2600 Fabricação de equipamentos de informática, produtos eletrônicos e ópticos
				31	2700 Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos
s15	Equipamento de transporte	34t35	Transport Equipment	32	2800 Fabricação de máquinas e equipamentos mecânicos
				33	2991 Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças
				34	2992 Fabricação de peças e acessórios para veículos automotores
s16	Comércio por atacado e comércio de comissões, exceto veículos automotores e motocicletas	51	Wholesale Trade and Commission Trade, Except of Motor Vehicles and Motorcycles	35	3000 Fabricação de outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores
s17	Fabricação de móveis	36t37	Manufacturing, Nec; Recycling	36	3180 Fabricação de móveis e de produtos de indústrias diversas
s18	Manutenção e Reparação de Veículos;	50	Sale, Maintenance and Repair of Motor Vehicles and Motorcycles; Retail Sale of Fuel	37	3300 Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
s19	Fornecimento de eletricidade, gás e água	E	Electricity, Gas and Water Supply	38	3500 Energia elétrica, gás natural e outras utilidades
				39	3680 Água, esgoto e gestão de resíduos
s20	Construção	F	Construction	40	4180 Construção
s21	Comércio atacado e varejo	52	Retail Trade, Except of Motor Vehicles and Motorcycles; Repair of Household Goods	41	4580 Comércio por atacado e varejo
s22	Transporte terrestre	60	Inland Transport	42	4900 Transporte terrestre
s23	Transporte de Marítimo	61	Water Transport	43	5000 Transporte aquaviário
s24	Transporte Aéreo	62	Air Transport	44	5100 Transporte aéreo
s25	Outras atividades de apoio e transporte auxiliar;	63	Other Supporting and Auxiliary Transport Activities; Activities of Travel Agencies	45	5280 Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio
s26	Hotéis e Restaurantes	H	Hotels and Restaurants	46	5500 Alojamento
				47	5600 Alimentação
s27	Correios e telecomunicações	64	Post and Telecommunications	48	5800 Edição e edição integrada à impressão
				49	5980 Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som e imagem
				50	6100 Telecomunicações
				51	6280 Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação
s28	Intermediações Financeiras	J	Financial Intermediation	52	6480 Intermediação financeira, seguros e previdência complementar
s29	Aluguel e outras atividades comerciais	71t74	Real Estate Activities	53	6800 Atividades imobiliárias
				54	6980 Atividades jurídicas, contábeis, consultoria e sedes de empresas
				55	7180 Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e P&D
s30	Outras atividades comerciais	70	Renting of M&Eq and Other Business Activities	56	7380 Outras atividades profissionais, científicas e técnicas
				57	7700 Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual
				58	7880 Outras atividades administrativas e serviços complementares
				59	8000 Atividades de vigilância, segurança e investigação

s31	Administração Pública e Defesa; Segurança Social Obrigatória	L	Public Admin and Defence; Compulsory Social Security	60	8400 Administração pública, defesa e seguridade social
s32	Educação	M	Education	61	8591 Educação pública
				62	8592 Educação privada
s33	Saúde pública e privada	N	Health and Social Work	63	8691 Saúde pública
				64	8692 Saúde privada
s34	Outras atividades comunitárias, sociais e pessoais	O	Other Community, Social and Personal Services	65	9080 Atividades artísticas, criativas e de espetáculos
				66	9480 Organizações associativas e outros serviços pessoais
		Q	Extra-territorial organizations and bodies	67	9700 Serviços domésticos

Apêndice I – Detalhes dos cálculos na construção da análise emergética de fluxos anual para o Brasil

Localização: Latitude -15.5809 Longitude -56.0661

1. Insumos da natureza renováveis (R) - Área é baseada na área cultivada no Setor 1

1.1 Energia Solar

Variável	Valor	Fonte
Insolação Média	1924,17 kWh/m ² /yr	(NASA, 2020)
Área de Incidência	5,09E+12 m ²	(GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012)
Albedo	0,14	(NASA, 2020)
$Energy = area * insolação * (1 - albedo)$	8,42E+15 kWh/yr	Calculada por este estudo
Fator de Conversão	3600000 J/kWh	(ALLEGRETTI, 2017)
Transformidade	1 seJ/J	(ODUM, H., 1996)
Atualização da Transformidade	1,68 seJ/J	(ODUM, H., 1996)
Energia	5,09E+22 seJ/J	Calculada por este estudo

1.2 Energia do Vento

Variável	Valor	Fonte
Velocidade	2,75 m/s	(NASA, 2020)
Área de Incidência	5,09E+12 m ²	(GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012)
Densidade do Ar	1,23 kg/m ³	(ODUM, H., 1996)
Velocidade geotrópica (60%)	1,65 m/s	(NASA, 2020)
Coefficiente de Drag	0,001	(ZHOU; ZHANG; CAI, 2010)
Fator de Conversão	3,15E+07 s/yr	(ALLEGRETTI, 2017; RUGANI <i>et al.</i> , 2014)
$Energy = area * densidade do ar * coef. drag * (velocidade geotrópica)^3$	2,81E+10 J	Calculada por este estudo
Transformidade	4,22E+03 seJ/J	(ODUM, H., 1996)
Energia	3,74E+21 seJ/J	Calculada por este estudo

1.3 Água da Chuva

Variável	Valor	Fonte
Precipitação Anual	5,88E+14 l/ano/m ²	(GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012)
Densidade da água	1 kg/l	
Área	5,09E+12 m ²	(GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012)
Energia Livre de Gibbs (ELG)	5,00E+03 J/kg	(ALLEGRETTI, 2017)
$Energy = area * precipitação * densidade da água * ELG$	2,94E+18 J/ano	Calculada por este estudo
Transformidade	1,82E+04 seJ/J	(ODUM, H., 1996)
Atualização da Transformidade	3,06E+04 seJ/J	(ALLEGRETTI, 2017)
Energia	8,99E+22 seJ/J	Calculada por este estudo

2. Insumos da natureza não-renováveis (N)

2.1 Água Cinza e Azul

Variável	Valor	Fonte
Água Azul utilizada	5,63E+17 l/ano	(ODUM, H., 1996)
Água Cinza utilizada	1,13E+14 l/ano	(ODUM, H., 1996)
Energia Livre de Gibbs (ELG)	5,00E+03 J/kg	(ALLEGRETTI, 2017)
Densidade da água	1 kg/l	
$Energy = densidade da água * ELG * água utilizada$	Azul = 5,63E+17 Cinza = 1,57E+17	Calculada por este estudo
Transformidade	8,06E+04	(ODUM, H., 1996)
Energia	Azul = 4,54E+22 Cinza = 1,26E+22	Calculada por este estudo

2.2 Energias primárias Industrial (soma de todos os setores)

Variável	Fluxo de Energia (J)*	Transformidade (seJ/J)	Fonte
Coal (N)	4,50E+17	6,72E+04	(ODUM, H., 1996)
Crude Oil (N)	4,11E+18	9,07E+04	(ODUM, H., 1996)
Gas (N)	8,02E+17	8,06E+04	(ODUM, Howard T., 2000)

Fonte de dados do fluxo de energia (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012). *soma de todos os setores.

3. Insumos da Economia- (M) e Serviços da Economia (S)

Os dados setoriais da economia foram embasados no valor bruto de produção da matriz insumo-produto do (IBGE, 2020). Que inclui os insumos intermediários domésticos, Importação e insumos primários (terra, capital e trabalho). Assim, a variável salário foi considerado como trabalho humano com uma parcela de 70% do valor sendo renovável (Sr) e o restante 30% como Sn (ORTEGA; ANAMI; DINIZ, 2002).

3.1 Energia Secundária Industrial (soma de todos os setores)

Variável	Fluxo de Energia (J)	Transformidade (seJ/J)	Fonte
Coke (N)	6,37E+15	6,72E+04	(ODUM, H., 1996)
Diesel (Sn)	9,72E+17	1,11E+05	(ODUM, H., 1996)
Gasolina (Sn)	8,48E+16	1,11E+05	(ODUM, H., 1996)
Produtos do Petróleo (Sn)	1,99E+18	1,11E+05	(ODUM, H., 1996)
Renováveis-Biodiesel (Sr)	3,54E+16	3,90E+05	(CAVALETT, 2008)
Renováveis-biodiesel (Sn)	8,00E+16	3,90E+05	(CAVALETT, 2008)
Outros renováveis (carvão de lenha) (Sr)	2,45E+18	1,80E+05	(ODUM, H., 1996)
Eletricidade (Sr)	1,92E+18	3,36E+05	(ODUM, H., 1996)
Eletricidade (Sn)	8,23E+17	3,36E+05	(ODUM, H., 1996)

Fonte de dados do fluxo de energia (GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012).

4. Serviços Adicionais (SA) - externalidades

As externalidades são incorporadas a partir das medidas a área de absorção de impacto (AAI) de mata nativa que é necessária para sequestrar as emissões do próprio processo produtivo assim como a área de floresta necessária para mitigar as perdas de solo, o cálculo da AAI foi desenvolvido segundo (ALLEGRETTI, 2017). Matematicamente a $AAI = \frac{IE}{CC}$, onde o AAI é a divisão entre o Impacto das Emissões (IE) - toneladas de CO₂- pela Capacidade de Compensação (CC) - capacidade da biomassa de mata nativa de sequestrar o carbono emitido (ton ha/ano)-. Depois de calculado o AAI em ha/ano, calcula-se a energia de externalidade das emissões: multiplicasse o valor encontrado pela produtividade média anual de biomassa de mata nativa (ton ha/ano), com o fator de conversão chega-se ao valor de J/ano. Foi considerado 7 anos de tempo necessário que a floresta atinja seu estágio adulta e cumpra os serviços ecossistêmicos, assim a produtividade (ton ha/ano) é dividida por 7, para calcular a emergência anual. Depois disso, a partir da transformidade da floresta, chega-se ao valor emergético da externalidade que pode então ser encorpado aos fluxos emergéticos de cada subsistema analisado.

4.1 Área de absorção de Impacto: compensação das Emissões

Variável considerada	Valor	Unidades de Medida	Fonte
Total de emissões (IE)	251288447,3	ton /ano	(GENTY; ARTO; NEUWAHL, 2012)
Sequestro de Carbono (CC)	277,8	ton/ha ano	(PESSOA; MARTINS, 2015)
Área de sequestro (AAI)	904566,0451	ha	Calculado por este estudo
Produção de biomassa	157,41/7= 22,43	ton/ha ano	(SILVEIRA, 2010)
Total de biomassa = AAI * Produção de biomassa	20289416,39	ton/ano	
Fator de Conversão 1	1,00E+03	kg/ton	
Fator de Conversão 2	4600	kcal/kg	
Fator de Conversão 3	4186	J/kcal	
Energia = Total de biomassa * FC1 * FC2 * FC3	3,91E+17	J/ano	
Transformidade	1,07E+04	sej/J	(BROWN, M.; BARDI, 2001)
Emergência	4,82E+21	seJ/yr	

Para a compensação da perda de solo, matematicamente a $AAI = \frac{\beta \text{ perda de solo}}{\beta \text{ recuperação do solo}}$, onde β perda de solo = quantidade de solo perdido * valor energético do solo * transformidade. Para o cálculo do valor energético do solo utiliza-se o teor de matéria orgânica no solo da região multiplicado pelo valor energético do quilograma de matéria orgânica de solo. Assim como foi feito no com as emissões, a área de absorção de impacto (AAI) encontrada é multiplicada pela sua produção de biomassa média anual e sua respectiva transformidade para identificação do fluxo emergético por compensação de perda de solo.

4.2 Área de absorção de Impacto: compensação de perda de solo

4.2.1 Perda de solo

Perda de solo	Aráveis	Permanente	Pastagens	Floresta
---------------	---------	------------	-----------	----------

Área (ha)	6,12E+07	7,30E+06	1,96E+08	2,44E+08
Perda média de solo por tipo de cultivo	5,30E+04	1,00E+04	5,50E+04	8,00E+03
Impacto	20	20	20	20
Perda de solo total	1,62E+11	3,65E+09	5,39E+11	9,76E+10
Teor de matéria orgânica	0,03883	0,24937	0,2336	0,03645
Fator de Conversão	5400	5400	5400	5400
Fator de Conversão	4186	4186	4186	4186
Transformidade (ORTEGA <i>et al.</i> , 2005)	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07	1,05E+07
Energia de Perda de solo	1,49E+24	2,16E+23	2,99E+25	8,45E+23

4.2.2 Recuperação de solo

Recuperação do Solo	Aráveis	Permanente	Pastages	Floresta
Área	6,12E+07	7,30E+06	1,96E+08	2,44E+08
Produção vegetal	22,43	22,43	22,43	22,43
Fator de Conversão	1000	1000	1000	1000
Fator de Conversão	4600	4600	4600	4600
Fator de Conversão	4186	4186	4186	4186
Transformidade (BROWN, M.; BARDI, 2001)	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06	1,07E+06
Energia de recuperação de solo	2,83E+25	3,37E+24	9,06E+25	1,13E+26