



Universidade de Brasília

Faculdade de Administração, Contabilidade, Economia e Gestão de Políticas Públicas

Departamento de Economia

ALINA BEATRIZ CORDEIRO DA SILVA

**COMPLEXIDADE ECONÔMICA DOS PAÍSES E SEU USO DE  
RECURSOS NATURAIS:  
PERSPECTIVA DA PRODUÇÃO VS PERSPECTIVA DO  
CONSUMO**

Brasília – DF

2024

ALINA BEATRIZ CORDEIRO DA SILVA

**COMPLEXIDADE ECONÔMICA DOS PAÍSES E SEU USO DE RECURSOS  
NATURAIS: PERSPECTIVA DA PRODUÇÃO VS PERSPECTIVA DO CONSUMO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Faculdade de Economia da Universidade de  
Brasília como requisito parcial para a obtenção  
do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador(a): Andrei Domingues Cechin

Brasília – DF

2024

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço meu orientador, Andrei Cechin, que me acompanhou nessa jornada que se iniciou como um possível projeto de PIBIC, passou por alterações de tema e, agora, tem seu fim como meu trabalho de conclusão de curso. Suas orientações me guiaram não apenas pelos temas e linhas de pesquisa, mas consequentemente me ajudaram a entender o que é esse processo de concluir um bacharelado e o que é possível daqui para frente. Sendo sempre muito aberto e compreensivo, principalmente com minhas questões pessoais e psicológicas, sinto que sem esse apoio, não seria capaz de realizar essa entrega.

## RESUMO

Este trabalho investiga a relação entre a complexidade econômica dos países e o uso de recursos naturais, analisando as perspectivas de produção (DMC - *Domestic Material Consumption*) e consumo (MF - *Material Footprint*). Os resultados demonstram que, embora a complexidade econômica apresente uma relação positiva com o aumento do uso de materiais, tanto para a produção quanto para o consumo, essa relação não se mostrou estatisticamente significativa, questionando sua relevância como variável explicativa no metabolismo socioeconômico global. Além disso, os achados tendem a apresentar os padrões de comportamento da teoria da Curva de Kuznets Ambiental (CKA), indicando que o crescimento econômico inicial tende a aumentar o consumo de recursos, mas com limitações à medida que as políticas ambientais afetam de maneira distinta o setor produtivo e a demanda final. Ao mesmo tempo que coloca em xeque seu próprio caminho metodológico, principalmente para a variável de Pegada Material, com relação ao tratamento da colinearidade entre as variáveis de renda, que pode ter influenciado seu resultado controverso. O estudo destaca, ainda, que, diante das restrições ambientais globais, países em desenvolvimento não podem seguir o mesmo caminho de industrialização dos países desenvolvidos sem consequências ambientais severas.

Palavras-chave: complexidade econômica, uso de recursos naturais, Curva de Kuznets Ambiental, desenvolvimento sustentável, políticas ambientais.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
2	REVISÃO TEÓRICA .....	9
2.1	Sobre complexidade, crescimento e desenvolvimento .....	9
2.2	Sobre ‘Metabolismo Social Econômico’ .....	12
2.2.1	Perspectiva da produção .....	17
2.2.2	Perspectiva do consumo .....	18
2.3	Entendimento do termo ‘ <i>Decoupling</i> ’ ou ‘Desacoplamento’ e das implicações ambientais do uso de recursos .....	19
2.4	Proposições:.....	22
3	ESTRATÉGIA DE ESTIMAÇÃO.....	23
3.1	Dados e variáveis utilizados .....	24
3.2	Modelo Final Escolhido.....	25
4	DISCUSSÃO E RESULTADOS .....	28
4.1	Resultados dos modelos de regressão para DMC e MF .....	30
5	CONCLUSÕES .....	33
	REFERÊNCIAS .....	35

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de recursos naturais tem sido um dos pilares centrais para o desenvolvimento econômico ao longo da história. Desde a Revolução Industrial, a extração e o consumo de matérias-primas como petróleo, carvão, minerais e água têm impulsionado o crescimento das economias, ao mesmo tempo em que criam desafios socioambientais significativos. Com a intensificação da globalização no último século, as economias do mundo tornaram-se cada vez mais interconectadas, resultando em uma cadeia produtiva global que transforma a maneira como esses recursos são geridos e distribuídos. Em 2023, o consumo mundial de materiais atingiu 100 bilhões de toneladas, de acordo com o *Global Material Flow Database* (UNEP), um aumento de mais de 160% em comparação com 2003.

Além disso, o crescimento acelerado de países, principalmente asiáticos, como China e Coreia do Sul, nas últimas décadas, apresentou uma alteração na logística global de gestão de recursos. Estes países passaram a focar suas economias em produtos tecnológicos, com alto valor agregado, o que modificou substancialmente o perfil do comércio internacional e da demanda por recursos, principalmente em relação a metais raros e outros insumos críticos para a produção de eletrônicos. Dessa forma, compreende-se que não apenas o uso de recursos pode afetar a economia, mas também a forma como são utilizados e transformados. O Relatório de Fluxos de Materiais da UNEP (2022) destacou que países com economias complexas têm uma eficiência 30% maior no uso de recursos quando comparados a economias baseadas em commodities.

Esse potencial de crescimento dos países emergentes é o ponto chave para compreender essas alterações, uma vez que sua meta de desenvolvimento, agora acoplada às questões ambientais, coloca em xeque as negociações internacionais. O crescimento econômico e demográfico implica um aumento produtivo e, conseqüentemente, um aumento da demanda por recursos energéticos e materiais, que permitem sustentar essa dinâmica. Ao mesmo tempo, os países desenvolvidos, com maior disponibilidade de tecnologia e capital, são capazes de reduzir as atividades de extração de matéria-prima e de segmentar seus processos produtivos por meio das cadeias globais de valor. Em 2023, a Europa reduziu sua extração de materiais em 20% enquanto aumentou sua dependência de importações de matérias-primas da África e da América Latina.

O debate internacional, em conferências como as COPs e reuniões de grupos como G20 e G7, trata das preocupações com os impactos ambientais inerentes à extração, produção e uso de recursos. Essas discussões acabam por estabelecer regras para as novas formas de crescimento, ao mesmo tempo que criam novos mercados potenciais para tecnologias sustentáveis. Países desenvolvidos, detentores de conhecimento e tecnologias a nível competitivo, tendem a demandar que seus investimentos sigam padrões e critérios muitas vezes desalinhados com a realidade dos países emergentes. Em 2024, a COP29 traz à tona a urgência de discutir financiamento climático, principalmente para garantir que países de baixa renda possam acessar capital para projetos de mitigação e adaptação às mudanças climáticas, especialmente nas áreas de infraestrutura e agricultura resiliente.

Este trabalho tem, então, como objetivo explorar a inter-relação entre o uso de recursos naturais e a complexidade das economias globais, analisando duas perspectivas: (i) da produção, com os índices de DMC (*Domestic Material Consumption*); (ii) de consumo, com os índices de MF (*Material Footprint*). Considerando a capacidade produtiva dos países através da complexidade de sua cesta de bens e as influências das políticas ambientais de cada um. A pesquisa pretende discutir como essa relação de demanda e oferta é essencial para entender a dinâmica da exploração de recursos e seu impacto, com o decorrer do tempo, na sustentabilidade global. A análise preliminar indica que países com maior complexidade econômica tendem a reduzir o uso de materiais na produção, apresentando uma correlação inversa entre DMC e o EPI (*Environmental Performance Index*).

A importância deste estudo reside na necessidade de compreender como a gestão dos recursos naturais pode ser otimizada em um contexto global cada vez mais complexo e interdependente. Através da análise de casos específicos e da revisão de literatura relevante, espera-se fornecer uma visão abrangente das relações econômicas e ambientais a partir do cenário contemporâneo, práticas atuais e propor questionamentos futuros. Um exemplo disso é a transição energética global, onde países como a Alemanha já conseguiram reduzir suas emissões de carbono em 40% desde 1990, enquanto países emergentes enfrentam maiores dificuldades em investir em energias renováveis devido ao alto custo inicial.

A previsão, segundo o Banco Mundial, é de que as economias apresentem um crescimento constante e significativo a longo prazo, acompanhado do aumento e envelhecimento populacional, com uma previsão de adição de quase 2 bilhões de pessoas até 2050 (Nações Unidas). Em seu relatório e previsão de cenário para 2060, a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) mostra como as quantidades de materiais

devem triplicar, mas com uma perspectiva de desaceleração, devido ao amadurecimento da economia chinesa. As emissões globais de gases de efeito estufa, porém, estão em rota de colidir com as metas do Acordo de Paris (2015), sendo improvável que o ‘net-zero’ seja atingido até 2060, como previam relatórios anteriores.

O Relatório de Desenvolvimento Sustentável (SDR) de 2024 indica que apenas 16% das metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estão no caminho certo para serem alcançadas globalmente até 2030, enquanto 84% mostram progresso limitado ou até retrocesso. As disparidades entre grupos de países continuam a crescer, com as nações nórdicas liderando os rankings de sustentabilidade, enquanto países pobres e vulneráveis ficam cada vez mais para trás. O financiamento climático torna-se, portanto, uma questão central, com a COP29 reforçando a necessidade urgente de os países de baixa renda terem acesso ao capital necessário para financiar seus projetos de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

É nesse contexto político, econômico e socioambiental que o presente trabalho se insere, com algumas inovações no processo de análise. Considerando as necessidades de entender melhor como os fluxos de materiais e as diferentes perspectivas de consumo impactam o uso de recursos, assim como compreender como o crescimento e o desenvolvimento dos países afetam seu desempenho ambiental, é possível estabelecer a seguinte pergunta norteadora e seus objetivos específicos: Como a complexidade econômica dos países se relaciona com seu uso de recursos naturais? ; Analisar o impacto da complexidade econômica no uso de recursos naturais necessários para a produção em diferentes territórios; Compreender como a complexidade econômica influencia o debate sobre desenvolvimento sustentável.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Nesta seção, inicialmente, explora-se a construção teórica do conceito de complexidade econômica e sua intrínseca relação com o crescimento e desenvolvimento socioeconômico. A partir dessa base conceitual, será possível compreender os desafios enfrentados por países emergentes na busca por alcançar suas metas de desenvolvimento e competitividade internacional, destacando as implicações econômicas e sociais decorrentes da cesta produtiva de suas economias.

Em seguida, o estudo avança para a análise do conceito de metabolismo social, abordado sob as perspectivas da oferta e da demanda dos países, o que permite uma compreensão mais ampla e detalhada da dinâmica das cadeias produtivas globais. Esse entendimento é essencial para identificar como os fluxos de recursos naturais estão sendo geridos e distribuídos em um mundo cada vez mais interdependente e complexo.

Por fim, a revisão teórica examina as inter-relações entre o uso de recursos naturais e as questões ambientais, abordando o conceito de desacoplamento (*decoupling*) e sua relevância no contexto das políticas ambientais contemporâneas. Essa discussão é complementada por uma análise crítica do debate político internacional sobre sustentabilidade, destacando os desafios e as oportunidades que emergem à medida que as nações tentam equilibrar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental.

### 2.1 Sobre complexidade, crescimento e desenvolvimento

Hidalgo, Hausmann et al. postulam, em seu Atlas da Complexidade Econômica (2011), o entendimento de que a complexidade econômica se refere primeiramente à multiplicidade de conhecimentos úteis incorporada a uma cadeia produtiva de bens e serviços. Essa conclusão provém do entendimento de que (i) há a necessidade da divisão de tarefas e conhecimentos na sociedade para que diferentes indivíduos possam se especializar em diferentes áreas, para que novas áreas sejam exploradas e novos conhecimentos úteis surjam e sejam repassados. Além disso, entende-se que (ii) o conhecimento só pode ser acumulado, transferido e preservado através do uso contínuo. Dessa forma, cada país possui seu próprio conjunto de conhecimentos

tácitos, que demandam tempo e investimento, e este conjunto, denominado pelos mesmos de “capacidades” (*capabilities*), geram resultados específicos e combinados.

Da mesma forma que Adam Smith definiu a divisão do trabalho para a riqueza das nações, a complexidade evidencia o conhecimento em cadeia necessário para se gerar resultados. Dessa forma, cada país consegue produzir os resultados a partir da sua própria rede de capacidades, não necessariamente é o que aquele país precisa ou é vantajoso em produzir, mas é aquilo que ele é capaz de fazer. A partir disso, entende-se que economias mais complexas possuem um conjunto de capacidades úteis cada vez mais vasto que geram resultados cada vez mais diversos e intensivos em conhecimento, e de forma oposta, economias mais simples possuem uma rede de capacidades mais limitada e tendem a gerar uma menor variedade de resultados, além de estes serem menos intensivos em conhecimento.

A análise utilizada pelos autores e a definição do índice de Complexidade Econômica, feitos através dos dados cross-section de comércio internacional, permitiu o entendimento de que (i) a complexidade é um fator gerador de crescimento econômico, ou seja, ao comparar países com um mesmo nível de complexidade, porém com níveis de renda diferentes, aqueles menos ricos tendem a ter níveis de crescimento maiores; (ii) a complexidade se mostra estatisticamente mais significativa para explicar as diferenças estruturais e econômicas dos países, além do próprio crescimento, do que outras variáveis como estabilidade política, competitividade e escolaridade.

Portanto, com os dados, Hidalgo e Hausmann (2011), conseguem concluir que o número de capacidades dos países e o número de produtos dos mesmos não se relaciona de uma forma linear. Deve-se considerar que uma mesma capacidade pode gerar uma variedade de produtos, assim como um mesmo produto, principalmente aqueles intensivos em conhecimento, necessitam de mais de uma capacidade. Além disso, essa relação não linear evidencia também que países com poucas (muitas) capacidades enfrentam incentivos baixos (altos) para a acumulação de capacidades adicionais, o que leva a um ciclo denominado pelos autores de Armadilha de Quiescência.

Ou seja, países com poucas capacidades tendem a ter poucas vantagens em acumular novas capacidades, pois a probabilidade de uma nova capacidade ser útil na produção de um novo produto é baixa. Em contrapartida, países com muitas capacidades podem combinar novas capacidades com as já existentes para criar novos produtos, resultando em retornos crescentes em termos de diversificação. Este fenômeno pode ajudar a explicar, por exemplo, a divergência

de renda entre os países nos últimos dois séculos, já que pequenas diferenças nos recursos e capacidades iniciais de um país, como capital humano, tecnologia, infraestrutura, e outros fatores que influenciam a produção e a inovação (*endowments*) seriam amplificadas ao longo do tempo.

É crucial observar que a complexidade trata de uma perspectiva da produção, uma vez que os dados utilizados do comércio internacional consideram aqueles produtos que são exportados pelos países. Apesar dos autores buscarem lidar com as limitações, como por exemplo o que é produzido em um país, mas não é exportado, ou mesmo os casos de produtos que eles exportam, mas não necessariamente tem sua produção sediada no mesmo território, a produção e sua exportação (oferta de produtos) são um viés da visão da complexidade como variável. Assim, influenciando todos os trabalhos subsequentes ao de Hidalgo e Hausmann.

As avaliações da influência da complexidade demonstram que países mais complexos têm mais capacidades de desenvolver e fazer uso de inovações e tecnologias limpas, em um contexto de desenvolvimento e mudança climática. Dessa forma, entende-se que o desenvolvimento industrial não precisa e nem pode ser feito nos padrões anteriores e que políticas ambientais, quando bem aplicadas, influenciam positivamente na implementação de uma estrutura de produção limpa (Romero; Gramkow, 2020). Estudos recentes reforçam essa visão ao demonstrar que economias mais complexas não apenas experimentam crescimento de renda per capita e menor desigualdade, mas também apresentam um impacto significativo na mitigação das mudanças climáticas (Rafque et al., 2021). A produção de bens de alta complexidade está associada à redução da intensidade das emissões de gases de efeito estufa (GEE), devido à maior eficiência econômica e tecnológica dessas economias (Romero; Gramkow, 2020). Dessa forma, entende-se que à medida que uma economia avança de uma estrutura produtiva agrícola para uma mais sofisticada, que inclui setores industriais e tecnológicos, assim como um arcabouço institucional mais robusto, o efeito geral sobre o desempenho ambiental é positivo, mas o efeito específico sobre a qualidade do ar é negativo (Boleti et. al, 2021).

Portanto, ao integrar políticas industriais e ambientais, é possível fomentar inovação e crescimento econômico que equilibre desenvolvimento social, econômico e ambiental, como um caminho para estabelecer uma estrutura de produção mais verde e menos intensiva em carbono. Além disso, embora a literatura tenha abordado de forma abrangente a relação entre complexidade econômica, desenvolvimento e o impacto na produção e uso de energia, em

termos de emissões, a exploração dessa relação em termos de consumo de recursos materiais ainda é limitada.

Em suma, a análise da complexidade econômica revela uma relação complexa e multifacetada entre as capacidades de um país e seus resultados econômicos e ambientais. Economias mais complexas, mais desenvolvidas e com uma rede robusta de capacidades, demonstram um potencial significativo para inovação e produção de bens sofisticados, também representam um aumento do uso e da necessidade de recursos produtivos, o que se traduz em implicações tanto econômicas quanto ambientais. Portanto, o presente trabalho busca inserir a noção de complexidade na relação de uso de recursos sob a ótica do consumo e da produção.

## 2.2 Sobre ‘Metabolismo Social Econômico’

O termo “Metabolismo Social”, em uma análise econômica, é utilizado e associado para compreender em uma perspectiva física ou material a interação entre sistemas econômicos e sociais com o meio ambiente. Assim, nas linhas teóricas é possível compreender os resultados desta interação, principalmente, em termos de sustentabilidade e impacto ambiental. Em termos gerais, o metabolismo refere-se à maneira como uma sociedade utiliza recursos naturais, transforma esses recursos em bens e serviços, e como essas atividades afetam o crescimento e desenvolvimento econômico assim como seus impactos no meio ambiente.

Fischer-Kowalski e Haberl (2015) definem o termo "metabolismo social" como a determinação da quantidade de recursos naturais que uma sociedade utiliza para sustentar suas atividades econômicas e sociais, sendo possível desenvolver métricas para quantificar esse metabolismo, o que permite uma estimativa considerável dos consequentes impactos ambientais advindos das atividades humanas. Em seu capítulo, “*Social metabolism: a metric for biophysical growth and degrowth*”, os autores exploram as questões relacionadas ao crescimento e declínio biofísico das sociedades, introduzindo o conceito de *degrowth* (decrecimento) como uma abordagem alternativa ao crescimento econômico ilimitado, focando na sustentabilidade e na redução do impacto ambiental.

Considerando os avanços teóricos na área, a partir do ressurgimento deste termo em 1960 e a continuidade do avanço dos estudos, foi possível estruturar um modelo figurativo que abrangesse os conceitos abordados nas teorias (Figura 1). A seguinte ilustração dos fluxos pode ser considerada um modelo padrão ou guia, permitindo a compreensão visual dos termos e

fenômenos estipulados pelos teóricos, além de evidenciar possíveis indicadores que explicitam o fluxo de materiais através da sociedade.

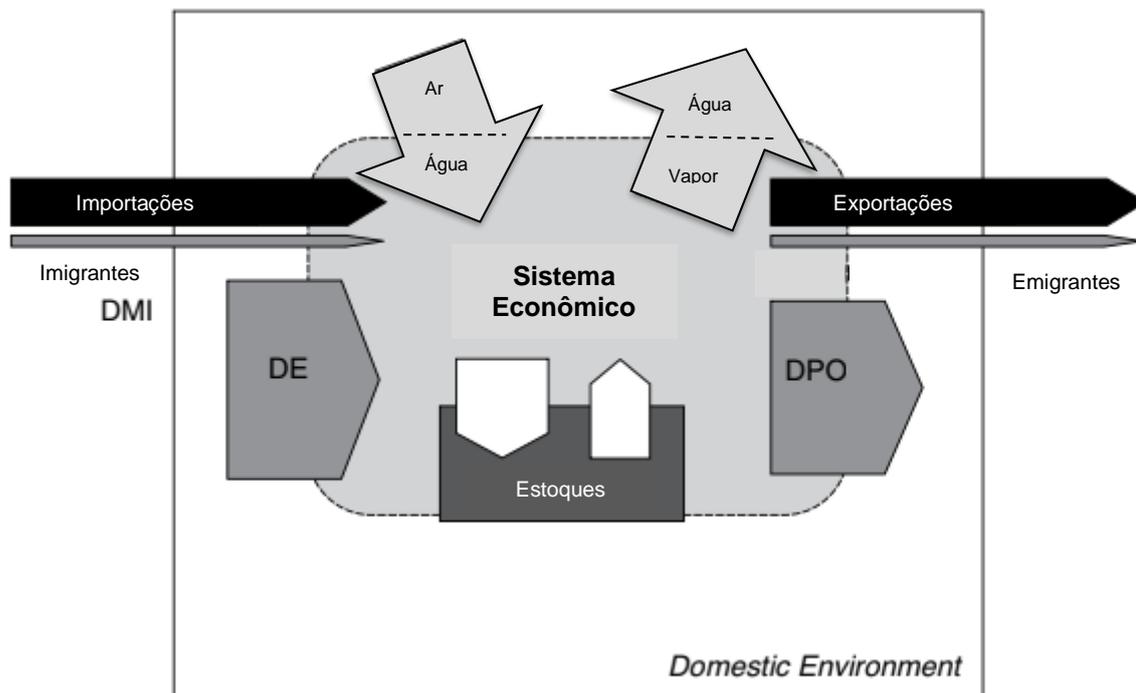


FIGURA 1 – “The material metabolism of a national economy”

Fonte: *Handbook of ecological economics*, 2015, p.102. Adaptado por Fischer-Kowalski & Haberl

Dessa forma, é possível ver uma sociedade econômica como um sistema que permite o fluxo de indivíduos (imigrantes e emigrantes) e de materiais e energia (importações e exportações). Assim como alguns fluxos indiretos, como:

- DE (Domestic Extraction)
- DMI (Domestic Material Input), composto pelas Importações e pela DE
- DPO (Domestic Processed Output), que pode ser identificado pelo DMI retirando as Exportações

Além disso, percebe-se o uso de um processo interno à economia que é o armazenamento de bens, produtos e capital. Além dessa dimensão física, os "estoques" podem ser conceituados como construções sociais e institucionais. Eles refletem a forma como uma sociedade produz, organiza suas atividades e se relaciona com o meio ambiente. Podem, então, ser tangíveis, como recursos naturais ou produtos armazenados em um determinado local, como podem ser intangíveis, como conhecimentos, habilidades ou práticas arraigadas em um sistema social, moldados por sua história, estrutura produtiva e atividades cotidianas. Esses "estoques"

são, portanto, característicos de cada sistema social e podem variar significativamente entre diferentes contextos (Matthews et al, 2000) (Fischer-Kowalski & Haberl, 2015).

Por fim, a representação da água e do ar usualmente ocorre apenas a nível de figura e consideração, uma vez que a contabilização dos seus valores reais nos fluxos acabaria por subestimar os valores de todos os outros materiais considerados pela sua magnitude. Há linhas de pesquisa específicas apenas para considerar, por exemplo, o metabolismo econômico da água e seu ciclo, que não será abordado neste trabalho.

Dessa forma, a medida da Pegada Material e do DMC, que também são indicadores de uso de recursos materiais, e serão explorados nas próximas seções, fazem o uso de conceitos específicos na sua construção, como é detalhado no Quadro 1:

## QUADRO 1

### Componentes dos indicadores de fluxo de materiais

<b>Indicador de Pegada Material</b>	
$MF = DE + RME_{im} - RME_{ex}$ <i>Material Footprint = Domestic Extraction + (Raw Material imports - Raw Material exports)</i>	
<b>Componentes</b>	<b>Descrição</b>
MF ( <i>Material Footprint</i> ou Pegada Material)	relata a quantidade de matérias-primas necessárias para atender à demanda final de um país e pode ser interpretada como um indicador do nível de vida material/nível de capitalização de uma economia. Por ser um
RMC ( <i>Raw Material Consumption</i> ou Consumo Doméstico de Matérias Primas)	Mede a quantidade total de matérias-primas necessárias para produzir os bens utilizados pela economia. Também é compreendido como Pegada Material, uma vez que
DE ( <i>Domestic Extraction</i> ou Extração de Materiais Domésticos)	Considera a quantidade de matéria-prima (excluindo água e ar), em peso físico, extraída do ambiente natural para uso interno na economia.
RME ( <i>Raw Material Equivalents</i> ou Equivalentes de Matéria Prima) - <i>imports</i> (RME importados) - <i>exports</i> (REM exportados)	As importações em RME são a quantidade de matéria-prima necessária para produzir os bens importados para a economia e os bens exportados da mesma economia.
<b>Indicador de Consumo Doméstico de Materiais</b>	
$DMC = DE + IMP - EXP$ <i>Domestic Material Consumption = Domestic Extraction + (Direct Imports - Direct Exports)</i>	
<b>Componentes</b>	<b>Descrição</b>

DMC ( <i>Domestic Material Consumption</i> ou Consumo Doméstico de Materiais)	Indicador padrão de contabilidade de fluxo de materiais (MFA) e relata o consumo <b>aparente</b> de materiais em uma economia nacional. O DMC mede a quantidade total de material (biomassa, combustíveis fósseis, minérios metálicos e minerais não metálicos) diretamente utilizados numa economia produtiva e com base em contas de fluxos diretos de material, ou seja, extração doméstica de material e importações e exportações físicas. O mesmo, não pode ser desagregado aos setores econômicos
IMP ( <i>Direct Imports</i> ou Importações Diretas) e EXP ( <i>Direct Exports</i> ou Exportações Diretas)	São os produtos físicos importados e exportados a partir de uma mesma economia.

Fonte principal: *Glossary - Material flow indicators – Eurostat Statistics Explained*

A questão do desenvolvimento sustentável, nesse contexto, busca então desenvolver e manter um metabolismo social que atenda às necessidades das pessoas (demanda social) considerando os equilíbrios ecológicos do ambiente e sendo resiliente a mudanças, ambientais e sociais. Isso significa estabilidade nos estoques socioeconômicos, com uso eficiente e de recursos renováveis, e com a ideia de economia circular. Uma vez que, assim como na física e química, os fluxos de entrada e saída devem se igualar considerando o valor líquido inserido no estoque, de forma que nada se perde, diretamente, apenas se transforma (F. Kowalski e Pedetris, 2016).

Dessa forma, a discussão pode ser detalhada em dois ramos: (i) o metabolismo energético e (ii) o metabolismo material. É importante ressaltar que diferentemente da economia clássica e atual *mainstream*, o ramo do metabolismo social considera que a principal fonte de crescimento é a disponibilidade e o acesso à recursos, tanto energéticos, como materiais.

Apesar do foco deste trabalho não ser a análise do metabolismo energético vale ressaltar alguns pontos, principalmente o entendimento que fontes eficientes de energia são entendidas como motores do desenvolvimento. Desde o carvão, na revolução industrial, passando pela descoberta dos combustíveis fósseis, até a atual capacidade de geração de eletricidade, são momentos históricos que passaram a ser definidos pela capacidade social de uso de energia em sua forma cada vez mais eficiente.

Essa busca por fontes de energia que superem o investimento energético gasto para obtê-la (EROI - Retorno Energético sobre Investimento) é crucial para se ter um nível produtivo cada vez mais potente. Por isso compara-se as energias renováveis às fósseis, pelos níveis de EROI inferiores e as limitações biofísicas, a substituição completa dos combustíveis fósseis pelas fontes renováveis não é considerada possível sem a redução de eficiência no crescimento econômico produtivo, como se entende atualmente (Fischer-Kowalski & Haberl, 2015). Dessa

forma, um dos grandes desafios, que vem sendo discutido em grandes conferências, como a COP, reside em encontrar soluções sustentáveis que equilibrem o desenvolvimento humano com a capacidade limitada da Terra de fornecer energia.

Ao mesmo tempo, a perspectiva do metabolismo material envolve camadas que serão tratadas mais detalhadamente ao longo das próximas seções, porém é importante ressaltar o entendimento de que houve uma transição significativa no uso de recursos naturais, no século XX, com o aumento no uso de recursos não renováveis, como combustíveis fósseis e minerais industriais, em detrimento da biomassa (Fischer-Kowalski & Haberl, 2015). Essa mudança, juntamente com o aumento da população e do PIB global, levou a um “desacoplamento relativo” (termo que é abordado na seção 2.3) do crescimento econômico e do crescimento material, o que significa que o crescimento econômico superou o aumento no uso de recursos, ficando subentendido então que o uso desses recursos foi mais eficiente para o crescimento econômico.

Dessa forma, análises através do DMC (*Domestic Material Consumption*), juntamente com a renda dos países, como feita por Steinberger et al. (2013), resulta em níveis de uso de materiais diferentes a depender do desenvolvimento do país, ou seja, quanto maior a maturidade econômica do país menor a sua necessidade de uso de materiais na economia. Ao mesmo tempo que países emergentes e aqueles classificados como de “desenvolvimento acelerado” tendem a ter uma necessidade de recursos maior.

O problema então é nesse sentido entender o decoupling ou a redução do uso intensivo de materiais através do DMC como uma medida de eficiência ecológica ou sustentável, sem considerar uma igualdade na perspectiva de consumo para o mesmo país. Considerando que os países industrializados de alta renda são os maiores importadores de materiais per capita, sugerindo que a aparente estagnação no uso de materiais (DMC) pode ser atribuída à terceirização de processos intensivos em energia e materiais para países em desenvolvimento (Muradian et al., 2012) (Fischer-Kowalski & Haberl, 2015).

Portanto, o uso para comparação de indicadores baseados na demanda se faz necessários, como é proposto por Wiedmann et al. (2013), com a Pegada Material. Países industrializados de alta renda tendem a ter um uso de recursos maior, indicado pela "pegada material" do que o que é indicado pelo seu DMC. Isso ocorre porque a pegada material considera não apenas os materiais extraídos e consumidos dentro do país, mas também os materiais necessários para produzir os bens que o país importa. Enquanto isso, os países de baixa renda, que geralmente não têm uma infraestrutura tão desenvolvida e dependem mais da exportação de matérias-primas, acabam com uma pegada material relativamente menor

(Fischer-Kowalski & Haberl, 2015). Sendo essa uma questão influenciada até pela própria renda dos países e a capacidade de consumação final de sua população.

### **2.2.1 Perspectiva da produção interna das economias**

DMC ou *Domestic Material Consumption* (Consumo Doméstico de Materiais) é um indicador baseado em demanda, o mesmo busca quantificar a quantidade de material utilizado em uma economia para se produzir, ou seja, o consumo proposto por este indicador é o aparente e não o final. Sendo composto pelas matérias primas extraídas (*Raw Material Extracted - RME*), somado ao saldo de Importações e Exportações físicas (*Physical trade Balance PTB = Imports - Exports*), esse tipo de indicador geralmente busca complementar indicadores de impacto, que, por outro lado, são baseados na fase produtiva, como os dados de emissões de gases de efeito estufa e produtividade (OECD, 2014).

Charlier & Fizaine (2022) revisam as teorias e avaliações de uso de materiais no desenvolvimento das economias e observa-se que, no geral, há a proposição de que essa relação se apresenta no formato de sino ou de U invertido, ao observar o PIB per capita e o uso de recursos naturais, sendo usualmente associado à Curva de Kuznets Ambiental (CKA) na visão de materiais (KCM). Tendo em vista que 3 etapas principais compõem esse processo: o início da industrialização de um economia agrária; o pico de produção máximo com infraestrutura de produção já estabelecida; e, por fim, o aumento da priorização e do impacto do setor de serviços, que acabam por reduzir a necessidade de material produtivo.

Porém cabe a argumentação de por que este fenômeno é observado e de quais as implicações reais disso, até por que as sociedades não pararam de consumir e grandes economias não pararam de produzir. Autores como Labys & Waddell (1989) propõem a ideia de transmaterialização ao invés de desmaterialização, ou seja, as economias fazem uso dos materiais de forma diferente, em ciclos, que não é capaz de ser formalmente observada pelos mesmos métodos, e dessa forma não deixam de utilizá-los. Outras vertentes apoiam a ideia do desacoplamento, ou seja, a redução da necessidade ou do uso de materiais para o crescimento econômico é possível, explorando as formas que isso pode ocorrer, com foco no crescimento.

## 2.2.2 Perspectiva do consumo final das economias

A Pegada Material ou *Material Footprint* (MF) busca expressar de forma direta o uso de matéria prima para consumo final de uma economia, compreendendo o uso dos materiais para produção geral e para o consumo próprio interno àquela economia (Wiedmann et al., 2013). Representando, então, a demanda agregada geral, seja para produzir, ou para consumir naquela sociedade. Por isso, aqui este indicador é indicado e utilizado como contraponto ao DMC, uma vez que os produtos comercializáveis contêm uma variedade maior de material para ser incorporado ao mesmo, além de exigirem mais recursos para serem produzidos, seja em questão de energia, água ou outros.

Assim, com a atual fase de globalização e comércio internacional, é compreensível que a cadeia produtiva se disperse pelo globo, por isso é importante relacionar exatamente o material consumido aqueles que demandam o seu produto final, considerando o ciclo produtivo como um todo. Considerando que 1) países mais ricos, tendem a consumir mais, tendo em vista que sua população tem maior capacidade de consumo (Wiedmann et al., 2013); 2) países mais ricos tendem a ter uma rede de cadeia produtiva complexa espalhada pelo globo (Zhang; Schimanski; 2014).

Dessa forma, o presente trabalho busca relacionar as cadeias de suprimentos globais à demanda final por recursos. A pegada material é um indicador para o padrão de vida material médio de um país. Assim, é possível identificar que o nível de desenvolvimento e bem-estar que os países buscam alcançar, se dá, em grande parte, através de padrões de consumo e produção altamente intensivos em recursos (Wiedmann et al., 2013), e que, considerando os impactos ambientais, não se mostram sustentáveis.

Além disso, a Pegada Material se difere substancialmente da Pegada Ecológica, pelo seu foco nos materiais já extraídos e comercializados internacionalmente. A P. Ecológica<sup>1</sup> considera a capacidade de geração de recursos ambientais comparado ao consumo e geração de resíduos por parte da sociedade. Sendo, por sua vez, um indicador mais direto de sustentabilidade. Torras e Moskalev (2017) analisaram a relação entre o GDP per capita e a pegada ecológica, apresentando resultados contra intuitivos. O aumento no GDP implica uma redução no índice de pegada ecológica, apesar do fato que os países mais ricos têm elevados níveis de pegada ecológica. Em suas discussões, os autores ponderam que a necessidade do

---

<sup>1</sup> Definição por *Global Footprint Network*. Disponível em: <https://www.footprintnetwork.org/our-work/ecological-footprint/>

consumo de materiais que não são diretamente extraídos de seus territórios acaba por influenciar essa relação e, por sua vez, o GDP linear não é capaz de evidenciar o ponto de inflexão. Ou seja, um possível nível de renda máximo que esses países atinjam para que seu nível de pegada passe a não aumentar na mesma proporção.

Em “*The Material Footprint of Nations*”, os autores reforçam a ideia de que o indicador de MF reflete a crescente interdependência das cadeias de valor e abastecimento globais, sendo este um indicador adequado para identificar a responsabilidade final do consumidor de um país pelos impactos associados à extração de matérias-primas em todo o mundo. Sendo de extrema relevância para o tópico de uso de materiais e sua associação inevitável com a sustentabilidade dos países.

### 2.3 Sobre ‘*Decoupling*’ a as implicações ambientais do uso de recursos

Ainda parece plausível que o crescimento econômico possa se dar de forma alheia às questões ambientais, apesar dos variados campos de estudos. As avaliações da forma que se faz uso dos materiais, do descarte e do consumo dentro das sociedades, mostram os impactos consideráveis no ambiente, fazendo das mudanças climáticas uma realidade presente e urgente. Dessa forma, o crescimento econômico, que usualmente é observado através do PIB, deve ser acompanhado de outras métricas, humanitárias como o IDH busca fazer, ou ambientais, como proposto por Ward et al (2007).

A dissociação entre o fenômeno do crescimento econômico e do uso de materiais pode ser avaliada pelo indicador do “decoupling” ou “dissociação”. Como já discutido neste trabalho, deve-se considerar a limitação de observar esse uso apenas pela ótica da produção, pelo seu viés favorável aos países mais ricos em questões de resultados de sustentabilidade. O mesmo já é considerado pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Agenda 2030 da ONU. “Objetivo 8. Promover o crescimento econômico inclusivo e sustentável, o emprego pleno e produtivo e o trabalho digno para todos: 8.4 Melhorar progressivamente, até 2030, a eficiência global dos recursos no consumo e na produção e procurar **dissociar** o crescimento econômico da degradação ambiental, em conformidade com o quadro decenal de programas sobre consumo e produção sustentáveis, com os países desenvolvidos assumindo a liderança” (Nações Unidas, Agenda 2030).

É interessante observar que a ideia do decoupling muitas vezes está associada à eficiência do uso de recursos, principalmente o decoupling relativo. Ou seja, o decoupling

relativo refere-se a taxas de crescimento econômico mais elevadas do que as taxas de crescimento do consumo de materiais e energia ou do impacto ambiental. Enquanto que o *decoupling* absoluto se caracteriza pelo crescimento econômico ao mesmo tempo que se tem a redução do uso dos materiais (Wiedmann et al., 2013) (Ward et al, 2007).

O conceito de *decoupling*, ou desacoplamento, está diretamente relacionado à intensidade do uso de recursos, sendo uma medida de como o crescimento econômico pode ser dissociado do aumento no consumo de recursos naturais. Na Análise de Fluxo de Materiais (MFA), essa relação é frequentemente expressa pela razão entre o Consumo Doméstico de Materiais (DMC) e o Produto Interno Bruto (PIB), ou seja, a Intensidade de Materiais (IM) (Vadén et. al, 2020). Quando o crescimento econômico (PIB) ocorre com uma redução relativa ou absoluta no uso de materiais, o *decoupling* está sendo alcançado, sinalizando que a economia está utilizando os recursos de maneira mais eficiente.

Ao longo dos últimos 100 anos, a redução dessa intensidade de uso de recursos, com a diminuição da razão DMC/PIB, indica um processo de *decoupling*, ou seja, as economias estão conseguindo crescer enquanto reduzem o uso de materiais por unidade de PIB. No entanto, essa tendência positiva no *decoupling* contrasta com o aumento dramático no uso per capita de recursos, revelando que, apesar dos avanços em eficiência, a demanda por recursos continua alta devido ao aumento populacional e ao crescimento contínuo do consumo (Vadén et. al, 2020). Assim, o *decoupling* reflete uma melhoria na intensidade de uso de recursos em termos de produção econômica, mas não resolve completamente a questão da dependência da humanidade em relação aos recursos naturais.

Nessa perspectiva, com as características da MF e do MDC, é possível compreender a dinâmica global do fluxo de materiais, considerando o contraste entre o uso eficiente dos recursos com o aumento da demanda pelos mesmos. Ao mesmo tempo que se observa essa relação através de perspectiva política, no sentido das relações internacionais de poder e troca. Assim, muitos autores já apontam para uma mudança no metabolismo social global, ou seja, uma alteração na balança comercial de importações e exportações, seja na proporção de uma para outra, mas também nos tipos de produtos que passaram a compor estas cestas.

Isso se dá, principalmente no âmbito dos países em desenvolvimento e dos não-desenvolvidos, com foco para a Ásia, principalmente a China e os “tigres asiáticos”, como Índia, e outras regiões como Brasil e Chile, nas Américas, e Rússia (Wiedmann et al., 2013). A nova dinâmica é que os países têm aumentado seu fornecimento de recursos primários para o desenvolvimento industrial de outros. O que indica o aumento dos valores do DMC para o primeiro e uma redução para o segundo, e conseqüentemente uma redução do *decoupling* para

os países exportadores do recurso e um aumento para aqueles que estão se desenvolvendo (Wiedmann et al., 2013) (Muradian, 2012).

O aumento da demanda por recursos primários, principalmente pelos atuais países de crescimento rápido, como a China, Índia e Coreia do Sul, que tem se industrializado de forma mais efetiva que a maioria dos países emergentes, acabam por elevar os preços internacionais das commodities. Dessa forma, há um cenário vantajoso para aumentar os ganhos na negociação internacional, como acontece para os países latino-americanos. As implicações dessa cadeia de acontecimentos se mostram com a piora de questões internas, como dos casos de ‘doença holandesa’, ou pela estagnação da indústria, que não ganha destaque (Muradian, 2012). Ou seja, os países que têm obtido resultados de crescimento, influenciados pelo aumento da sua complexidade econômica, acabam por ditar a nova ordem dos fluxos de materiais a nível internacional.

Essa dinâmica contemporânea destaca uma continuidade histórica de uma apropriação oculta de valor do Sul pelo Norte Global. No qual a persistência de uma “troca desigual” permite que Norte Global cresça economicamente, dependendo da apropriação de recursos e trabalho do Sul Global, assim como ocorreu durante os tempos coloniais, sem uma compensação equivalente. Hickel et al. (2022) estima esse manejo de recursos através da matriz insumo-produto (MRIO). Os resultados apontam que, para um período de 25 anos (1990-2015), o Norte apropriou-se de 12 bilhões de toneladas de materiais brutos, 822 milhões de hectares de terra, 21 exajoules de energia e 188 milhões de anos-pessoa de trabalho, tendo impactos ecológicos e desenvolvimentistas no Sul.

Porém, independentemente do dado utilizado, sempre é possível encontrar falhas no método de medição ou mesmo nos resultados encontrados. Isto pois, observando o decoupling, por exemplo, através do PIB, pode-se superestimar o mesmo caso haja um ‘boom’ financeiro, ou outros fenômenos semelhantes, que alterem bruscamente o valor do mesmo, sem necessariamente variar a quantidade de recurso material efetivamente utilizado. Ao mesmo tempo, observá-lo através do DMC pode implicar o desbalanceamento real do uso de recursos para diferentes nações, pela separação da produção e do consumo na cadeia produtiva globalizada (Ward et al, 2007).

Dessa forma, é importante ressaltar tais questões, uma vez que, em uma economia mundial baseada no consumo de recursos, a dissociação, deve se tornar possível efetivamente para que metas sustentáveis sejam viáveis na redução ou reversão dos impactos ambientais (Ward et al, 2007). Por isso, o presente trabalho busca ponderar o fenômeno do decoupling

pelas práticas já utilizadas, como também por meio de novos parâmetros, buscando considerar a dinâmica contemporânea da economia global, através principalmente da perspectiva do consumo.

## **2.4 Proposições:**

**Hipótese 1:** À medida que se tornam mais ricos e mais economicamente complexos, os países tendem a reduzir a taxa de uso do Consumo Doméstico de Materiais (DMC). Dessa forma, o cenário inverso também se faz verdadeiro.

**Hipótese 2:** À medida que se tornam mais ricos e mais complexos, os países tendem a aumentar a taxa de Pegada Material (Material Footprint). Dessa forma, o cenário inverso também se faz verdadeiro.

**Hipótese 3:** Quanto melhor os resultados de um país em perspectivas ambientais, medidos através do Environmental Performance Index, maior será sua pegada material, evidenciando o deslocamento dos impactos do consumo para outros territórios

### 3 ESTRATÉGIA DE ESTIMAÇÃO

A estratégia de estimação para este estudo foi definida a partir de um processo de avaliação de diferentes possibilidades. Inicialmente, definiu-se a amostra a ser considerada, composta apenas por observações que apresentam dados disponíveis para todas as variáveis utilizadas em conjunto, garantindo assim a consistência e comparabilidade entre as diferentes unidades analisadas. Sendo, a base de dados final estruturada no modelo em painel.

A partir disso, foi realizada uma análise exploratória com a base de dados completa, seguida por testes adicionais com amostras filtradas para intervalos de 2 em 2 anos e 5 em 5 anos, calculados a partir da média móvel para o período. Essas filtragens foram aplicadas para as duas regressões propostas: Consumo Doméstico de Materiais (DMC per capita) e Pegada Material (MF per capita) como variáveis dependentes, permitindo uma comparação mais detalhada do comportamento das variáveis ao longo do tempo.

Durante o processo de estimação, surgiram questões relacionadas à variável Produto Interno Bruto (GDP). A presença de colinearidade afetou o uso da variável quadrada de GDP ( $GDP^2$ ), levando à necessidade de "centralizar" essa variável, ou seja, subtrair sua média, de modo que o termo quadrado pudesse ser incluído no modelo sem ser automaticamente descartado por conta de alta correlação com o termo linear.

Adicionalmente, apresentou-se a necessidade de lidar com o "log" de valores negativos e/ou de valores zerados nas variáveis, que geram impossibilidade de serem calculados ou tendem a valores infinitos, impossibilitando a realização dos modelos econométricos. Para contornar esse problema, foi implementada a substituição desses valores por um número ínfimo (próximo de zero), de forma a permitir o cálculo dos logs sem comprometer a integridade dos resultados. Essas correções garantiram que as estimativas fossem incluídas no cálculo dos modelos, considerando as peculiaridades dos dados e as limitações das variáveis envolvidas.

Com base nas etapas descritas, a estratégia de estimação foi aprimorada ao longo de um processo iterativo de ajustes e correções nos dados e nas variáveis, assegurando a viabilidade dos modelos econométricos. As próximas seções apresentarão em detalhe as variáveis utilizadas na análise e o modelo final selecionado, refletindo o rigor metodológico adotado ao longo do estudo.

### 3.1 Dados e variáveis utilizados

Os dados utilizados neste estudo foram coletados de 4 fontes: (i) Banco Mundial, (ii) UNEP IRP *Global Material Flows Database*; (iii) *Harvard Dataverse*; (iv) *EPI Data*. Ao todo, a base final abrange o período de 2000 a 2019, considerando uma amostra de 106 países, permitindo uma análise detalhada e diversificada ao longo do tempo.

A partir do Quadro 2, é possível entender a variável utilizada, sua descrição, como é considerada na equação e sua respectiva fonte dos dados:

**QUADRO 2**  
Variáveis utilizadas no modelo de estimação escolhido

Símbolo na equação	Descrição e medida	Tipo de variável	Fonte
DMC.cap	Domestic Material Consumption per capita (kg/cap)	Dependente	UNEP <i>International Resource Panel</i>
MF.cap	Material Footprint per capita (kg/cap)	Dependente	UNEP <i>International Resource Panel</i>
GDPpc	PIB per capita em dólar atual (current US\$)	Explicativa	<i>World Bank Data</i>
GDPpc_s	PIB per capita ao quadrado em dólar atual (current US\$)	Explicativa	<i>World Bank Data</i>
sitc_eci	Índice de complexidade	Explicativa	<i>Harvard Dataverse</i>
EPI	Índice de Desempenho Ambiental	Controle	<i>EPI website</i>
industry	Participação da indústria no PIB (%)	Controle	<i>World Bank Data</i>
energy	Uso final de energia renovável (%)	Controle	<i>World Bank Data</i>
d09-d12	-	Dummies	-

Elaboração Própria

### 3.2 Modelo Final Escolhido

A escolha de metodologia utilizada neste trabalho, com o modelo de efeitos fixos, se justifica pela capacidade desse modelo de lidar com problemas de endogeneidade que surgem da correlação entre os efeitos não observados e as variáveis explicativas. Em modelos de dados em painel, é comum que existam características específicas e não observadas, próprias a cada unidade, que se mantêm constantes ao longo do tempo, mas que influenciam os resultados da análise. O modelo de efeitos fixos resolve esse problema ao remover o impacto dessas variáveis constantes no tempo, garantindo maior consistência nas estimativas.

Ao utilizar um modelo de efeitos fixos, estamos assumindo que existem diferenças entre as unidades analisadas (países, empresas, etc.), mas que essas diferenças podem ser controladas ao tratar os efeitos individuais não observados como variáveis correlacionadas com os regressores (variáveis explicativas). O modelo de efeitos fixos oferece uma solução para a endogeneidade ao eliminar qualquer correlação entre os efeitos individuais não observados e as variáveis explicativas, o que é essencial para a consistência das estimativas. Diferente do modelo de efeitos aleatórios, que pressupõe que os efeitos não observados sejam independentes das variáveis explicativas (Gujarati; Porter, 2011). Isso é fundamental, pois, na prática, essas características individuais podem, e muitas vezes estão correlacionadas com as variáveis explicativas, e ignorar essa correlação pode levar a estimativas viesadas.

Wooldridge reforça essa visão ao argumentar que, no contexto macroeconômico, o uso de efeitos fixos não implica que o intercepto seja tratado como não aleatório, mas sim que se permite uma dependência arbitrária entre o efeito não observado (que, na prática, corresponde ao intercepto) e as variáveis explicativas observadas. Isso significa que o modelo de efeitos fixos reconhece que o efeito individual de cada unidade pode estar correlacionado com as variáveis explicativas, ao contrário do modelo de efeitos aleatórios, que assume independência.

Em termos práticos, ao aplicar o modelo de efeitos fixos, remove-se o efeito constante de cada unidade (país ou empresa, por exemplo) e, assim, garante-se que as variáveis explicativas não sejam influenciadas por essas características individuais não-observadas. Uma vez que, no modelo de efeitos fixos, cada unidade possui um intercepto diferente, mas os coeficientes que medem a influência das variáveis explicativas são os mesmos para todas as unidades, conforme destacado nas fontes de painel de dados.

Ao todo, a base de dados utilizada possui 106 países, para um período de 20 anos, que foram somados 2 a 2 (logo  $t = 10$ ), como tentativa de observar variações mais significantes, apresentando um total de 1060 amostras. A partir disso, a montagem das regressões e a seleção das variáveis, deve-se considerar as seguintes estatísticas descritivas, expostas na Tabela 1:

TABELA 1  
Análise estatística das variáveis reais

Estatística	<i>Min</i>	<i>Mean</i>	<i>Max</i>	<i>Median</i>	<i>Skewness</i>	<i>Kurtosis</i>
log_DMC.cap	7,63	1,15	1,33	1,15	-0,46	0,99
log_MF.cap	7,63	1,14	1,32	1,14	-0,20	-0,41
log_GDPpc	4,74	8,52	1,15	8,49	-0,04	-0,95
log_GDPpc_s <sup>2</sup>	9,49	1,70	2,31	1,70	-0,04	-0,95
log_GDPpc_sc	6,79	1,84	2,28	1,86	-1,39	5,40
sitc_eci <sup>3</sup>	-20.719.008,50	696.352,00	27.960.819,50	0,05	1,13	6,02
EPI	0,00	52,77	90,68	54,02	-1,14	2,42
log_industry <sup>4</sup>	-2,35	-1,30	-0,32	-1,34	0,44	-0,43
log_energy	-9,21	-1,96	-0,04	-1,56	0,86	-0,43

Com a presença do logaritmo é perceptível que há uma suavização dos seus valores e da distribuição da maioria das variáveis, especialmente aquelas com assimetrias muito grandes ou outliers, observados pelos valores das estatísticas de *Skewness* e *Kurtosis*, que como seria o caso de MF.cap, DMC.cap e GDP. Dessa forma, as variáveis logarítmicas se tornam preferíveis por sua capacidade de tornar a análise mais robusta.

Dessa forma, ainda é perceptível a grande faixa de valor da variável de complexidade, principalmente ao comparar sua média (696.352) com sua mediana (0,05), o que indica uma influência grande dos países mais complexos nos dados. Além de países serem muito mais complexos que outros com a presença significativa de outliers, através da observação da estatística de *Kurtosis* (6,02), estando de acordo com as ideias postuladas por Hidalgo e Hausmann. Considerando que poucos países conseguem efetivamente ser cada vez mais complexos e produzir cada vez mais bens oblíquos, sem se prenderem na Armadilha da Quiescência.

A partir da escolha das variáveis e suas ponderações, a forma das regressões finais é dada por:

<sup>2</sup> Correlação perfeita entre GDPpc e GDPpc\_s

<sup>3</sup> Grande geração de valores nulos (510 NANs)

<sup>4</sup> Para os valores zerados, substitui-se por 0,0001 para o cálculo do logaritmo

EQ.1:  $\log(\text{DMC.cap}) = \log(\text{GDPpc}) + \log(\text{GDPpc.s}) + \text{sitc.eci} + \text{EPI} + \log(\text{industry}) + \log(\text{energy}) + \text{dummies}$

EQ. 2:  $\log(\text{MF.cap}) = \log(\text{GDPpc}) + \log(\text{GDPpc.s}) + \text{sitc.eci} + \text{EPI} + \log(\text{industry}) + \log(\text{energy}) + \text{dummies}$

O modelo escolhido permite capturar as variações no uso de materiais e na pegada material entre os países ao longo do tempo, considerando fatores econômicos (como PIB per capita e complexidade econômica) e setoriais (como a importância da indústria e do setor energético). As variáveis dummies permitem controlar por características específicas e inobservadas dos países, garantindo que os efeitos individuais de cada país, que são constantes ao longo do tempo, sejam adequadamente tratados.

Esse modelo é adequado para analisar a relação entre crescimento econômico e uso de recursos naturais, dado trabalhos similares, como é o caso em Pothen e Welsch (2018); e Charlier e Fizaine (2023). A transformação logarítmica aplicada tanto às variáveis dependentes quanto às explicativas captura a elasticidade entre os fatores analisados, o que significa que podemos interpretar os coeficientes como as variações percentuais no uso de materiais em resposta a variações percentuais nas variáveis explicativas.

Espera-se, portanto, que o modelo mostre que à medida em que as economias se tornam mais complexas, e aumentam seu PIB per capita, observa-se, por um lado, uma redução da demanda por recursos naturais para se produzir no próprio território, refletido na redução do indicador DMC, enquanto, por outro lado, observa-se um aumento da demanda por recursos naturais para satisfazer a demanda final das sociedades, refletido no aumento do indicador MF. Ao mesmo tempo, a inclusão de variáveis de controle relacionadas (i) à eficiência energética pode demonstrar um impacto mitigador no uso de recursos, refletindo avanços tecnológicos ou políticas de sustentabilidade, e (ii) à participação da indústria no PIB pode refletir o nível de industrialização do país, mas também considerar a cadeia produtiva global e suas divisões internacionais. Dessa forma, esses resultados serão essenciais para entender as dinâmicas entre desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental em diferentes contextos nacionais.

## 4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

No geral, observa-se um comportamento de correlação entre o GDP e o DMC de forma não linear, enquanto que, diferentemente da relação do GDP com a MF, há uma tendência linear, principalmente para países Muito Complexos, como pode ser observado nos gráficos 1 e 2 a seguir.

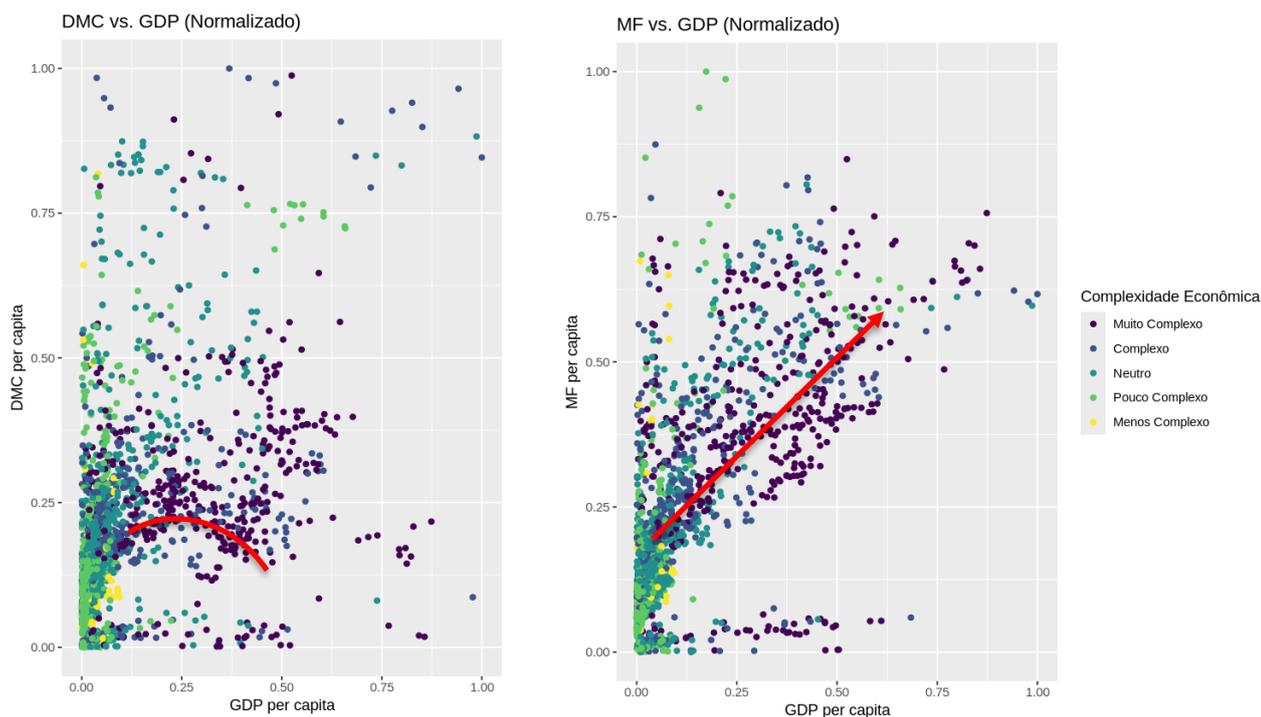


GRÁFICO 1 e 2 – Relação do PIB dos países com o uso de recursos pelo DMC (1) e MF (2)  
Fonte: Elaboração Própria

O primeiro gráfico (DMC vs GDP) apresenta uma relação em formato de "U invertido" refletindo a *Curva Ambiental de Kuznets*, a qual sugere que o uso de recursos materiais aumenta nos estágios iniciais de desenvolvimento econômico, mas diminui à medida que as economias se tornam mais complexas e adotam tecnologias mais eficientes e limpas, reduzindo o consumo de materiais. Já no segundo gráfico (MF vs GDP) a tendência mais linear as, revela que o aumento do GDP tende a elevar de forma contínua a pegada material, sem o padrão de redução observado no DMC, mesmo para economias mais complexidades.

Essa mesma relação, para os dados de complexidade se mostram semelhantes, como observado nos gráficos 3 e 4 a seguir:

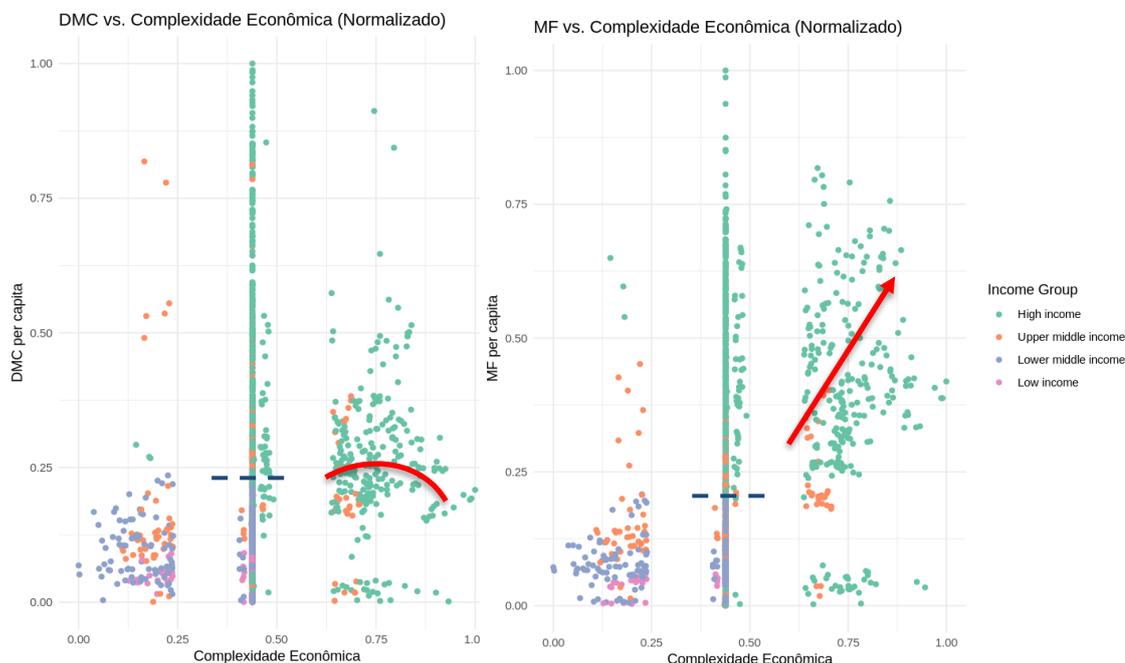


GRÁFICO 3 e 4 – Relação do PIB dos países com o uso de recursos pelo DMC (3) e MF (4)  
Fonte: Elaboração Própria

A relação entre DMC e a complexidade econômica, representada no terceiro gráfico (DMC vs Complexidade Econômica), também segue um padrão de "U invertido, refletindo a maior eficiência na utilização de recursos materiais por parte das economias mais complexas. Por fim, o quarto gráfico (MF vs Complexidade Econômica) demonstra uma relação semelhante entre o MF per capita e a complexidade econômica. No entanto, os dados sugerem que, mesmo nas economias mais complexas, a pegada material não diminui na mesma proporção que o DMC.

Assim como é possível observar, através dos gráficos 3 e 4, que há uma divisão da quantidade de recursos que os países menos complexos e de baixa renda consegue mover quando comprado aos países de alta complexidade e alta renda. Sendo possível observar pela divisão de cores, especificada na legenda das figuras.

#### 4.1 Resultados dos modelos de regressão para DMC e MF

A partir da tabela 2, é possível perceber que em ambos os modelos, o PIB per capita ( $\log\_GDPpc$ ) tem um impacto positivo e altamente significativo, o que não é surpreendente, dado que, conforme o PIB per capita aumenta, o consumo de materiais tende a crescer. No caso do DMC, o coeficiente de 0,278 sugere que um aumento de 1% no PIB per capita resulta em um aumento de 0,278% no consumo de materiais. No entanto, para a Pegada Material (MF), o coeficiente é drasticamente maior (2290), indicando que o crescimento econômico tem um impacto muito mais acentuado sobre a pegada material do que sobre o consumo doméstico. Essa diferença significativa pode ser explicada pela complexidade envolvida na Pegada Material, que inclui não apenas o consumo doméstico, mas também as importações de materiais e a incorporação de insumos nos produtos finais.

A inclusão do termo quadrático do PIB per capita ( $\log\_GDPpc\_sc$ ) em ambas as regressões sugere uma possível curvatura na relação entre o desenvolvimento econômico e o consumo de materiais, mas a significância estatística desse termo é fraca. Os coeficientes pequenos, -0,0228 para DMC e -198 para MF, indicam que a relação pode ser ligeiramente não linear, mas o efeito é marginal. Esse resultado sugere que, embora o crescimento econômico inicial tenda a aumentar o consumo de materiais, esse efeito pode diminuir em economias mais avançadas, possivelmente devido à transição para atividades econômicas menos intensivas em materiais.

TABELA 2  
Comparação entre as equações finais estabelecidas (1) e (2)

Variváveis	Regressões	
	(1) $\log(DMC.cap)$	(2) $\log(MF.cap)$
$\log\_GDPpc$	0,278 ***	2290 ***
$\log\_GDPpc\_sc$	-0,0228 .	-198 .
sitc_eci	0,00000714	0,00000284
EPI	-0,00201	91,8 ***
$\log\_industry$	0,205 .	2120 .
$\log\_energy$	-0,177 ***	-1050 *
d9	-0,0744	-73,5
d10	-0,101 *	228
d11	-0,0185	1810 **
d12	-0,00434	615
R-squared	0,03	0,126
F-statistic	78200	13,6

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

No que diz respeito à complexidade econômica (*sitc\_eci*), seu impacto é praticamente insignificante em ambas as regressões, com relação às suas estatísticas, assim como com seus coeficientes muito próximos de zero. Esse resultado é inovador, uma vez que a linha teórica e o raciocínio sugerem que economias mais complexas, com uma maior diversidade de produtos, deveriam ter um impacto mais evidente no uso de recursos e na pegada ambiental. A falta de significância pode indicar que a complexidade econômica não se traduz diretamente em maior ou menor consumo de materiais, ou que a medida de complexidade utilizada (*sitc\_eci*) não captura adequadamente as dinâmicas econômicas associadas ao uso de recursos. Ou seja, pode ser que a relação entre as variáveis se dê de forma inversa, com as variáveis de fluxo de recurso explicando a construção da complexidade dos países.

A variável EPI, que mede o desempenho ambiental, apresenta resultados contrastantes entre os modelos. No caso do DMC, o coeficiente é negativo, mas não significativo (-0,00201), sugerindo que o desempenho ambiental de um país não tem um efeito claro sobre seu consumo de materiais para o sistema produtivo. No entanto, para o MF, o coeficiente é muito maior e altamente significativo (91,8), indicando que países com melhor desempenho ambiental apresentam uma maior Pegada Material. Esse resultado pode ser explicado por fatores metodológicos, como a forma como o EPI é construído, ou por características das economias desenvolvidas, que possuem alto desempenho ambiental, mas também alto consumo indireto de materiais através de importações. Além disso, cabe considerar que, um melhor desempenho ambiental necessita de uma construção institucional, social e tecnológica melhor estabelecida e efetiva, o que tende a refletir em termos de maiores níveis de renda e conseqüentemente maior capacidade de consumo.

A industrialização (*log\_industry*) tem um impacto positivo marginal sobre o consumo de materiais no modelo do DMC (coeficiente de 0,205), sugerindo que economias mais industrializadas consomem mais materiais. Para o MF, o efeito é igualmente positivo, mas com um coeficiente muito maior (2120), o que é consistente com a ideia de que a industrialização está fortemente associada à pegada material global, especialmente quando consideramos o impacto das cadeias de valor globais que envolvem o transporte e processamento de insumos materiais.

A variável *log\_energy*, que capta o consumo de energia, tem um impacto negativo e altamente significativo no DMC (-0,177), sugerindo que economias que consomem mais energia tendem a ter um DMC per capita menor. Esse resultado pode parecer contraintuitivo, mas pode ser explicado por mudanças estruturais na economia, onde a transição para fontes de

energia mais limpas ou o aumento da eficiência energética resulta em menor consumo de materiais. Considerando que o EROI das energias renováveis é consideravelmente menor, essa redução do consumo se daria ou pelo uso de tecnologias limpas mais eficientes, ou pela redução da atividade produtiva interna ao país. No caso do MF, o coeficiente é igualmente negativo (-1050), embora menos significativo, sugerindo que o uso de energia também está associado à redução da Pegada Material, mas com um efeito menos robusto ou não tão direto quanto para o DMC.

As variáveis dummy (d9 a d12) capturam efeitos específicos de categorias ou períodos. No modelo DMC, a variável d10 é negativa e significativa (-0,101), sugerindo uma diferença estatística relevante nesse período, enquanto d11 e d12 não são significativas. É interessante notar que esse período, representa justamente os anos anteriores ao Acordo de Paris (2013-2014). Para o modelo MF, a variável d11 é altamente significativa e positiva (1810), sugerindo que esse período, pós Acordo de Paris (2015-2016) tem uma influência relevante sobre a Pegada Material, enquanto as demais variáveis dummy não têm significância estatística relevante. Cabe ressaltar que o modelo não captura os períodos de pandemia da COVID-19, por falta de dados consistentes para a quantidade de países selecionados.

Em termos técnicos de capacidade explicativa dos modelos, os valores de  $R^2$  indicam que ambos os modelos têm baixa capacidade preditiva. O modelo para o DMC explica apenas 3% da variação observada, enquanto o modelo para o MF explica 12,6%. Além disso, para os valores da estatística F, que ambos os modelos são relevantes ao p-valor (0,05), tem-se que as variáveis consideradas são importantes para a discussão. Isso sugere que, considerando a baixa taxa de explicação estatística, ainda há variáveis e dinâmicas não capturadas pelos modelos.

Em suma, é perceptível que as dinâmicas das variáveis explicativas se alteram significativamente ao comparar as duas óticas. O PIB per capita tem um impacto positivo consistente em ambas as variáveis de fluxo de materiais, e a inclusão de variáveis como o índice de desempenho ambiental, uso final de energia renovável e industrialização adiciona complexidade às relações, sugerindo que o desenvolvimento econômico está associado a padrões variados de consumo de materiais e de impacto ambiental. No entanto, a baixa capacidade explicativa dos modelos permite novas possibilidades de explorações, principalmente se tratando do índice de complexidade e sua reação com o fluxo de recursos.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos tendem a apoiar a teoria da Curva de Kuznets Ambiental (CKA), principalmente para a relação entre o PIB per capita e o DMC per capita, demonstrando que o crescimento econômico inicial tende a aumentar o consumo de materiais para o sistema. O mesmo cenário acontece para as demandas finais (MF), sendo um resultado contraditório e questionável frente a literatura. Que, no presente trabalho considera-se que houve interferência do tratamento dos dados, principalmente para lidar com a colineariedade entre GDPpc e GDPpc\_s.

Isso pois, no caso de, dado um certo nível de renda, os países serem capazes de reduzir sua Pegada Material, entende-se que sua economia passou a não depender de um nível de consumo e nem do seu nível de produção, mas não revela o que poderia ter se alterado nesse sistema para que o consumo de materiais não aumentasse e o crescimento se mantivesse. Mesmo em um cenário ideal de economia circular, a demanda por recursos finais aumentaria, seja pela necessidade de materiais a serem reciclados ou compensados, seja pelo próprio fim de crescimento.

O problema do fenômeno de aumento do uso de recursos é que, diante do cenário ambiental atual, não se considera mais viável que os países em desenvolvimento sigam o mesmo caminho de industrialização que os países desenvolvidos utilizaram para alcançar altos níveis de renda per capita. Isso se deve ao fato de que, com as fronteiras ecológicas já cruzadas — como a emissão excessiva de gases de efeito estufa, a perda de biodiversidade e o esgotamento dos recursos naturais — o planeta enfrenta limites ambientais que tornam insustentável, no longo prazo, o modelo tradicional de desenvolvimento com consequências que impactam o próprio sistema produtivo e consumidor.

Considerando a 3ª e última hipótese, tem-se resultados de que a influência do EPI é oposta ao avaliar DMC e MF per capita. Evidenciando o impacto redutor que as políticas ambientais tem sobre o volume de consumo para o setor produtivo de um país, ao mesmo tempo que elas permitem o aumento do consumo final, apesar da sua significância ser mais expressiva ao tratar da MF. Dessa forma, entende-se que os impactos do consumo não são necessariamente gerados ou alocados àqueles que demandam, mas sim àqueles que extraem e produzem.

Em suma, quanto aos objetivos iniciais do trabalho, percebe-se que a complexidade não se mostrou estatisticamente significativa para explicar o uso de recursos dentro do

metabolismo socioeconômico global, apesar de ter apresentado uma relação positiva com ambas as variáveis, o DMC e a MF. Dessa forma, cabe investigar o porquê de sua insignificância estatística, assim como investigar em outras variáveis relacionadas ao uso de recursos em que ela se mostre relevante.

## 5.1 Considerações, Limitações e Propostas

Os dados disponíveis para uso de recursos materiais não têm sido atualizados no mesmo ritmo para a maioria dos países, perdendo uma quantidade significativa de amostras para depois de 2019;

O presente trabalho não faz divisão para grupos de países, por renda ou grupo econômico, assim como não considera as diferentes categorias de recursos materiais dentro das variáveis DMC e MF. Sendo possível novos estudos com a separação da base de dados em 3 grupos - renda baixa, média e alta – assim como a realização das regressões por tipo de recursos. Identificando o impacto da complexidade econômica em cada um deles;

É possível fazer análises de DMC e MF per capita para diferentes grupos de países predefinidos e observar se o comportamento de U-invertido se mantém ou não, considerando as variáveis ambientais e de produção (EPI, *energy*, *industry*). Além de considerar outras variáveis de análise, como o próprio Uso de Intensivo de Materiais (*Material Intensity*) e afins;

O fato de que a complexidade não se mostra estatisticamente significativa para explicar DMC ou MF abre possibilidade para explorar a relação inversa, ou seja, DMC e MF explicando ECI, mas também especificar se para alguma outra variável de recursos a complexidade pode se mostrar significativa;

Finalmente, cabe explorar se há alguma relação da complexidade com o formato de U-invertido da curva de Kuznets.

## REFERÊNCIAS

- BOLETI, Eirini; GARAS, Antonios; KYRIAKOU, Alexandra; LAPATINAS, Athanasios. Economic complexity and environmental performance: Evidence from a world sample. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 26, p. 251–270, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09750-0>.
- BLOCK, S.; EMERSON, J. W.; ESTY, D. C.; DE SHERBININ, A.; WENDLING, Z. A., et al. 2024 **Environmental Performance Index**. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2024. Disponível em: [epi.yale.edu](http://epi.yale.edu).
- CHARLIER, Dorothée; FIZAINÉ, Florian. Decoupling gross domestic product and consumption of raw materials: A macro-panel analysis. **Chemical Engineering Research and Design**, Annecy-le-Vieux, França, v. 15, p. 1-10, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.12.020>.
- FISCHER-KOWALSKI, Marina; HABERL, Helmut. Social metabolism: a metric for biophysical growth and degrowth. In: **Handbook of Ecological Economics**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2015. p. 100-138. DOI: <https://doi.org/10.4337/9781783471416.00009>.
- GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Down C. **Econometria básica**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2011. Disponível em: [https://doi.org/10.1126/science.1186874.ECONOMETRIA\\_BASICIA\\_5\\_edicao\\_Gujarati.pdf](https://doi.org/10.1126/science.1186874.ECONOMETRIA_BASICIA_5_edicao_Gujarati.pdf).
- HAUSMANN, Ricardo; HIDALGO, César A.; BUSTOS, Sebastián; COSCIA, Michele; CHUNG, Sarah; JIMENEZ, Juan; SIMOES, Alexander; YILDIRIM, Muhammed A. **The Atlas of Economic Complexity: Mapping Paths to Prosperity**. Cambridge, MA: Harvard University, 2011. ISBN 9780615546629.
- HAUSMANN, Ricardo; HIDALGO, César A. The network structure of economic output. **Journal of Economic Growth**, v. 16, p. 309–342, 2011. DOI: 10.1007/s10887-011-9071-4.
- HICKEL, Jason; DORNINGER, Christian; WIELAND, Hanspeter; SUWANDI, Intan. Imperialist appropriation in the world economy: Drain from the global South through unequal exchange, 1990–2015. **Global Environmental Change**, v. 73, 2022, p. 102467. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102467>.
- MATTHEWS, Emily et al. **The Weight of Nations: Material Outflows from Industrial Economies**. Washington, D.C.: World Resources Institute, 2000.

MURADIAN, Roldan; WALTER, Mariana; MARTÍNEZ-ALIER, Joan. Hegemonic transitions and global shifts in social metabolism: Implications for resource-rich countries. **Global Environmental Change**, v. 22, p. 559-567, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.03.004>.

NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.

NAÇÕES UNIDAS. **População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050**, diz relatório da ONU. Disponível em: [https://brasil.un.org/pt-br/crescm\\_pop\\_mundial](https://brasil.un.org/pt-br/crescm_pop_mundial).

OECD. **Green Growth Indicators 2014**. *OECD Green Growth Studies*. OECD Publishing, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264202030-en>.

OECD. **Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences**. OECD Publishing, Paris, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.

POTHEN, Frank; WELSCH, Heinz. Economic development and material use: Evidence from international panel data. **Environmental Economics and World Trade**, Hannover, Alemanha, v. 15, p. 1-15, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.06.006>.

RAFQUE, Muhammad Zahid et al. Does economic complexity matter for environmental sustainability? Using ecological footprint as an indicator. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 54876–54891, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15002-4>.

ROMERO, João P.; GRAMKOW, Camila. Economic complexity and greenhouse gas emissions. **World Development**, v. 128, p. 1-10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105317>.

THE GROWTH LAB AT HARVARD UNIVERSITY. Growth Projections and Complexity Rankings. **Harvard Dataverse**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.7910/DVN/XTAQMC>.

TORRAS, Mariano; MOSKALEV, Sviatoslav A.; HAZY, James K.; ASHLEY, Allan S. An econometric analysis of ecological footprint determinants: Implications for sustainability. **International Journal of Sustainable Economy**, v. 9, n. 2, p. 127-143, 2017.

UNEP. **Global Material Flows and Resource Productivity: An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel**. Paris: United Nations Environment Programme, 2016. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/global-material-flows-and-resource-productivity>.

UNITED NATIONS. **SDG Indicator 8.4.2: Domestic Material Consumption, Domestic Material Consumption Per Capita, and Domestic Material Consumption Per GDP**. New York: United Nations, 2022. Disponível em:

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-08-04-02.pdf>.

UNITED NATIONS. **SDG Indicator 8.4.1: Material Footprint, Material Footprint Per Capita, and Material Footprint Per GDP**. New York: United Nations, 2022. Disponível em:

<https://unstats.un.org/sdgs/metadata/files/Metadata-08-04-01.pdf>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **International Resource Panel, Global Material Flows Database**. UNEP IRP Global Material Flows Database. Disponível em:

<https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>.

VADÉN, T.; LÄHDE, V.; MAJAVA, A.; JÄRVENSIVU, P.; TOIVANEN, T.; HAKALA, E.; ERONEN, J.T. Decoupling for ecological sustainability: A categorization and review of research literature. **BIOS Research Unit**, Helsinki. 2020.

WARD, James D. et al. Is decoupling GDP growth from environmental impact possible? **PLoS ONE**, Adelaide: University of South Australia, v. 1, p. 2471, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164733>.

WIEDMANN, Thomas O. et al. The material footprint of nations. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. 3, p. 827-828, 2013. DOI: 10.1073/pnas.1220362110.

WOOLDRIDGE, Jeffrey M. **Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data**. MIT Press, 2010.

WORLD BANK. **Global Economic Prospects**, June 2024. Washington, DC: World Bank, 2024. ISBN 978-1-4648-2058-8. DOI: 10.1596/978-1-4648-2058-8. Disponível em: <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo>.

WORLD BANK. World Bank national accounts data, and OECD National Accounts data files. Disponível em: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>.

ZHANG, Liping; SCHIMANSKI, Silvana. Cadeias globais de valor e os países em desenvolvimento. **Boletim de Economia e Política Internacional - BEPI**, IPEA, n. 18, p. 74-92, set./dez. 2014.

## APÊNDICE A – PROCESSO DE SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS

Ao realizar as estatísticas descritivas para cada variável tem-se, inicialmente, a Tabela 1 a seguir:

TABELA 1  
Análise estatística das variáveis reais

Estatística	Min	Mean	Max	Median	Skewness	Kurtosis
DMC.cap	2.048,00	128.012,84	617.870,00	99.881,75	1,92	4,32
MF.cap	2.057,00	125.406,27	554.534,50	85.092,50	1,21	0,70
GDPpc	114,90	12.995,44	101.698,86	4.879,10	1,87	3,40
GDPpc_s*	13.190,10	470.041.416,13	10.342.659.427,04	23.810.532,82	4,13	23,03
GDPpc_sc	884,56	301.159.870,76	7.868.297.277,78	120.804.300,49	5,74	42,77
sitc_eci	-20.719.008,50	696.352,00	27.960.819,50	0,05	1,13	6,02
EPI	0,00	52,77	90,68	54,02	-1,14	2,42
industry	0,10	0,29	0,72	0,26	1,52	2,69
energy	0,00	0,30	0,96	0,21	0,86	-0,43

\*correlação perfeita entre GDPpc e GDPpc\_s

Considerando os altos valores e as assimetrias positivas ( $Skew > 1$ ) para DMC.cap e MF.cap, que são as variáveis dependentes, faz sentido tentar normalizar a equação com o uso de logaritmo. Ambas possuem os valores das medianas abaixo aos das médias, o que sugere a presença de valores muito elevados (outliers), principalmente para o DMC ( $Kurt > 4$ ), que puxam o resultado da média para cima. Essa característica faz sentido no contexto global, no qual a desigualdade e o porte dos países influenciam na sua capacidade de extração de matéria prima, exportação e/ou uso da mesma.

Ao observar as estatísticas para as variáveis de PIB, ou seja, GDPpc e suas variações GDPpc\_s (squared) e GDPpc\_sc (squared and centered), também é perceptível a assimetria positiva e a presença forte de outliers, principalmente para as variáveis ao quadrado ( $Skew > 4$  &  $Kurt > 20$ ). Assim como, ao comparar os valores de suas médias, as mesmas também se encontram acima das medianas.

Ressaltando o caso das variáveis industry e energy, que por serem uma representação em porcentagem, e de EPI, por variar entre 0 e 100, não apresentando valores muito elevados e sendo consideravelmente melhor distribuídos que as outras variáveis ( $Kurt < 3$ ). Os valores aproximados entre as médias e medianas, também revelam isso. Considerando que para energy e EPI, o valor da média abaixo da mediana revela que é mais comum que o países não tenham um desempenho ambiental considerável e que a participação da energia renovável no consumo final dos mesmos, seja algo mais restrito.

Por fim, cabe ressaltar para o índice de complexidade (*sitc\_eci*), sendo a única variável com valores negativos. Considerando o valor de sua mediana próximo a zero, identifica-se um cenário ponderado, no qual a grande quantidade de países acaba por compensar valores muito discrepantes do índice. Porém, ao observar sua média, significante maior, entende-se que há a presença de outliers significativos que puxam a distribuição para a direita, com *Kurt* > 6 e *Skew* > 1. Dessa forma é possível entender que há pouco países que são significativamente mais complexos do que outros e que, há um padrão de complexidade necessário para os países em desenvolvimento, que tendem a ser a maioria presente na amostra.

Ao inserir o logaritmo, para comparações, tem-se na Tabela 2 as estatísticas para cada variável:

TABELA 2  
Análise estatística das variáveis logarítmicas

Estatística	<i>Min</i>	<i>Mean</i>	<i>Max</i>	<i>SD</i>	<i>Median</i>	<i>Range</i>	<i>Skewness</i>	<i>Kurtosis</i>
log_DMC.cap	7,63	1,15	1,33	0,82	1,15	5,71	-0,46	0,99
log_MF.cap	7,63	1,14	1,32	0,89	1,14	5,60	-0,20	-0,41
log_GDPpc	4,74	8,52	1,15	1,50	8,49	6,79	-0,04	-0,95
log_GDPpc_s	9,49	1,70	2,31	3,00	1,70	1,36	-0,04	-0,95
log_GDPpc_sc	6,79	1,84	2,28	1,74	1,86	1,60	-1,39	5,40
log_sitc_eci*	-5,66	3,33	1,71	7,12	-0,11	2,28	1,16	-0,43
log_EPI**	-9,21	3,25	4,51	3,06	3,99	1,37	-3,80	1,25
log_industry**	-2,35	-1,30	-0,32	0,31	-1,34	2,03	0,44	-0,43
log_energy	-9,21	-1,96	-0,04	1,71	-1,56	9,17	0,86	-0,43

\*grande geração de valores nulos (510 NANs)

\*\* para os valores zerados, substitui-se por 0,0001 para o cálculo do logaritmo

Com a presença do logaritmo é perceptível que foi possível realizar a suavização da distribuição da maioria das variáveis, especialmente aquelas com assimetrias muito grandes ou outliers, observados pelos valores das estatísticas de *Skewness* e *Kurtosis*, além da comparação entre as médias e medianas, como feito anteriormente. Dessa forma, as variáveis logarítmicas se tornam preferíveis por sua capacidade de tornar a análise mais robusta.

Cabe ressaltar que houve a necessidade de substituição de valores zerados por uma representação muito próxima de zero (0,001), pela não existência do log de zero. Além disso, a transformação da variável de complexidade não se mostra muito favorável, por ter muitos valores negativos, seu resultado se perde para 510 amostras. Dessa forma, faz sentido mantê-la em sua forma real, assim como a variável de EPI, pelo aumento em sua estatística de skew negativa, realçando que certos países possuem o desempenho ambiental extremamente baixo.

## APÊNDICE B – MODELOS REGRESSIVOS PARA DMC PER CAPITA

Na Tabela 3, ao estimar o modelo para o DMC per capita, os coeficientes para o PIB per capita (GDPpc) e seu quadrado (GDPpc<sup>2</sup>) apresentaram o comportamento esperado: o coeficiente para o PIB per capita é positivo, enquanto o coeficiente para o PIB per capita quadrado é negativo, resultando em uma relação em formato de U-invertido. Ambos são estatisticamente significativos, ainda que a níveis diferentes, em todas as especificações.

Esse padrão está em linha com a Curva de Kuznets Ambiental (CKA), sugerindo que, em estágios iniciais de desenvolvimento, o crescimento econômico intensifica o uso de recursos naturais e piora os indicadores ambientais. No entanto, após um determinado nível de renda per capita, as economias tendem a se tornar mais complexas e a conscientização ambiental aumenta, levando à adoção de tecnologias mais limpas e políticas ambientais mais rígidas, reduzindo a pressão sobre os recursos.

Por outro lado, a variável de complexidade econômica (ECI) não se mostrou estatisticamente significativa para explicar o DMC per capita, ainda que uma relação positiva tenha sido observada. Isso pode indicar que, embora economias mais complexas tendam a aumentar o consumo de materiais inicialmente, os benefícios em termos de eficiência e inovação tecnológica podem se manifestar apenas a longo prazo. Dessa forma, a relação riqueza e complexidade se mostra, de modo geral, contra a proposição da Hipótese 1. Havendo um ponto de inflexão que altera a dinâmica da relação entre GDP e DMC per capita, sendo possível acontecer o mesmo para a variável de complexidade.

TABELA 3

Resultados do modelo final de log(DMC.cap)

log(DMC.cap)	Regressões					
Variável	1	2	3	4	5	6
log(GDPpc)	0,240563	0.225200	2,25E-01	2,48E+03 ***	2,78E-01	***
log(GDPpc_sc)		-0,034649	-0,034615	-3,28E+02 **	-2,28E-02	.
sitc_eci			2,68E-06	2,81E-06	7,14E-06	
EPI				-3,99E-03 *	-2,01E-03	
log(industry)					2,05E-01	.
log(energy)					-1,77E-01	***
d9					-7,44E-02	
d10					-1,01E-01	*
d11					-1,85E-02	

d12					-4,34E-03
R-squared	8,58E-02	9,43E-02	9,37E-02	1,00E-01	3,00E-02
F-statistic	8,94E+05	4,95E+05	3,30E+05	2,64E+04	7,82E+04

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

É interessante observar que, em (4) o EPI se faz significativo no intervalo de confiança de 99,9%, porém ao adicionar outras as variáveis de controle, o EPI perde essa significância para explicar o DMC *per capita*. Ao mesmo tempo que, sua relação negativa revela que um aumento da performance ambiental dos países implica a redução do volume per capita de materiais consumidos no sistema produtivo dos países. Ao mesmo tempo, ao inserir as variáveis de controle, especificamente, quando se trata do consumo de energia renovável, a mesma se faz muito significativa para explicar o DMC *per capita*. Considerando que o aumento do uso de energias renováveis no país implica na redução de 0,17% no seu consumo de materiais per capita para o setor produtivo.

Na regressão (4) para o DMC *per capita*, o EPI se mostrou significativo a um nível de confiança de 99,9%, mas perdeu essa significância quando outras variáveis de controle foram adicionadas. O coeficiente negativo do EPI indica que uma melhoria no desempenho ambiental dos países tende a reduzir o DMC *per capita*, uma vez que políticas ambientais rigorosas promovem a adoção de tecnologias mais limpas e o uso mais eficiente de recursos.

As variáveis dummies de ano, especialmente a referente ao período 2013-2014, mostraram uma redução no DMC *per capita* dos países, o que pode estar relacionado à crescente adoção de políticas ambientais e energéticas mais rígidas, em antecipação ao Acordo de Paris. Essa redução é possivelmente mais notável em países desenvolvidos, que provavelmente tiveram maiores incentivos e recursos para implementar essas mudanças.

No geral, apesar do valor para o coeficiente  $R^2$  em cada caso ser consideravelmente, explicando apenas entre 3% e 10% de todas as regressões avaliadas, as estatísticas F possuem valores elevados a um p-valor  $< 2.22e-16$ . Dessa forma, pode-se concluir que as variáveis utilizadas apesar de relevantes, não necessariamente explicam com precisão o DMC *per capita*, sendo possível considerar modelos alternativos.

## APÊNDICE C – MODELOS REGRESSIVOS PARA MF PER CAPITA

Para a pegada material, com as regressões na tabela 4, observa-se que os coeficientes de PIB *per capita* e seu quadrado também seguem o formato de U-invertido, indicando uma relação do tipo à CKA, apesar de não muito significativa, indo contra a literatura em Wiedmann (2015) e Charlier e Fizaine (2023), indicando uma possível interferência do tratamento dos dados para retirar a colineariedade entre GDP\_c e GDPpc\_s.

A relação com a complexidade econômica segue o mesmo padrão observado para o DMC per capita: apesar de a variável não ser estatisticamente significativa, observa-se uma tendência de que o aumento da complexidade econômica leve a um aumento na pegada material. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que países mais complexos possuem cadeias produtivas mais diversificadas e intensivas em materiais, assim como demandam esse tipo de produto, o que consequentemente aumenta o consumo de recursos.

TABELA 4  
Resultados do modelo final de log(MF.cap)

log(MF.cap)	Regressões						
Variável	1	2	3	4		5	
log(GDPpc)	0,230491	0,216505	2,16E-01	2,49E+03	***	2,29E+03	***
log(GDPpc_sc)		-0,031544	-3,12E-02	-2,86E+02	**	-1,98E+02	.
sitc_eci			2,49E-05	2,51E-09		2,84E-06	
EPI				-5,71E-03	***	9,18E+01	***
log(industry)						2,12E+03	.
log(energy)						-1,05E+03	*
d9						-7,35E+01	
d10						2,28E+02	
d11						1,81E+03	**
d12						6,15E+02	
R-squared	8,54E-02	9,30E-02	9,37E-02	1,07E-01		1,26E-01	
F-statistic	8,90E+05	4,88E+05	3,28E+05	4,03E-03		1,36E+01	

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

A variável EPI se mantém significativamente explicativa nas regressões (4) e (5), apesar da alteração do seu módulo. Dessa forma entende-se que, sem variáveis de controle, a relação entre o EPI e a pegada material é negativa, ou seja, conforme os países melhoram seu desempenho ambiental a tendência seria de reduzir o consumo final da economia. Ao controlar a regressão considerando a participação do setor industrial no PIB e o consumo final de energia renovável nos países, ambas com certo nível de significância, a relação EPI e MF se inverte.

Ou seja, infere-se que o aumento da participação industrial gera aumento na pegada material, aumentando a produção e o consumo, ao mesmo tempo que o aumento da participação de energia renovável na economia final tende a reduzir o nível da pegada material per capita.

Para a pegada material, as dummies de destaque correspondem ao período de 2015-2016, refletindo o impacto inicial da assinatura do Acordo de Paris. A implementação de políticas voltadas à redução do impacto ambiental da produção e consumo de materiais nesses anos pode explicar a relação observada. Além disso, as estatísticas  $R^2$  e F se comportam de forma semelhante ao modelo para DMC.cap, dessa forma, tem-se novamente baixos valores para  $R^2$ , entre 9% e 13%, assim como altos valores para a estatística F, com p-valor muito reduzido.

Em suma, ambas as equações, para DMC.cap e MF.cap, apesar de utilizarem variáveis importantes para explicar a composição das mesmas, não há completa precisão nas relações sendo possível reconsiderar variáveis e possivelmente dados.