Regulação Ambiental e Comércio Global de Resíduos: Paraíso da Poluição ou Especialização Eficiente?

Jennyfer Ferreira da Silva (UFV); Michelle Márcia Viana Martins (UFV), Alan Leal (FGV)
Área ANPEC 7 - Economia Internacional

Resumo: O comércio internacional de resíduos ultrapassa 80 bilhões de dólares anuais e concentrava-se na China até 2018, quando a política *National Sword* fechou o mercado chinês aos resíduos plásticos. Este estudo pergunta se a regulação ambiental e a capacidade de processamento do país importador determinam de forma distinta o comércio de dois materiais de estruturas opostas, o plástico e a sucata de alumínio, e qual foi o efeito causal daquele choque. O objetivo é separar dois mecanismos que a literatura costuma tratar em conjunto, o paraíso da poluição e a especialização eficiente, e medir o impacto da política sobre os fluxos. A estratégia combina um modelo gravitacional estrutural com um estimador de tripla diferença que usa o alumínio, poupado pela política, como contrafactual do plástico. Os resultados mostram que a regulação governa o comércio de plástico, que migra para destinos permissivos de baixa capacidade, ao passo que o alumínio responde à capacidade instalada e não à regulação, e que a *National Sword* reduziu em cerca de 82% as exportações de plástico dos países mais dependentes da China, deslocando-as para jurisdições de governança mais frágil. A principal contribuição é demonstrar, com identificação causal, que um mesmo instrumento regulatório produz efeitos opostos conforme o material. Formuladores de política e organismos multilaterais, como a Convenção de Basileia, beneficiam-se ao dispor de um critério objetivo para o controle de exportações de resíduos: a capacidade verificada de processamento do destino, e não a divisão binária entre países ricos e pobres.
Palavras-chave: comércio internacional de resíduos; capacidade de processamento; *National Sword*.
Classificação JEL: F18; Q53; Q56

Environmental Regulation and Global Waste Trade: Pollution Haven or Efficient Specialization?

Abstract: *International waste trade exceeds 80 billion dollars a year and was concentrated in China until 2018, when the National Sword policy closed the Chinese market to plastic waste. This study asks whether environmental regulation and the importer's processing capacity shape the trade of two materials with opposite market structures, plastic and aluminum scrap, in distinct ways, and what the causal effect of that shock was. The goal is to separate two mechanisms the literature usually treats jointly, the pollution haven and efficient specialization, and to measure the policy's impact on trade flows. The strategy combines a structural gravity model with a triple-difference estimator that uses aluminum, spared by the policy, as a counterfactual for plastic. Results show that regulation governs plastic trade, which moves toward permissive low-capacity destinations, whereas aluminum responds to installed capacity rather than regulation, and that the National Sword cut plastic exports from the most China-dependent countries by about 82%, displacing them toward weaker-governance jurisdictions. The main contribution is to demonstrate, with causal identification, that a single regulatory instrument produces opposite effects depending on the material. Policymakers and multilateral bodies such as the Basel Convention benefit from an objective criterion for controlling waste exports: the destination's verified processing capacity, rather than the binary divide between rich and poor countries.*
Keywords: *international waste trade; recycling capacity; National Sword.*

1. Introdução

A governança do comércio internacional de resíduos pressupõe regras que tratam materiais heterogêneos sob um conjunto comum de normas, ainda que cada material responda a determinantes econômicos próprios. A política chinesa *National Sword*, que restringiu a importação de resíduos plásticos a partir de 2018, evidencia essa heterogeneidade. Ocomércio mundial de plástico registrou retração a partir de então, enquanto o de sucata de alumínio, exportado pelos mesmos países e não alcançado pela medida, seguiu crescendo por razões de mercado. O contraste entre um material atingido e outro poupado pela

mesma política motiva o presente estudo e possibilita distinguir a importância da regulação ambiental e da capacidade de processamento na determinação dos fluxos.

O comércio internacional de resíduos movimentou mais de 80 bilhões de dólares em 2022 e cresceu a taxas anuais superiores a 6% entre 2000 e 2017, consolidando-se como segmento da economia circular global (UN Comtrade, 2025). Boa parte desse fluxo não é rejeito, mas insumo secundário para cadeias industriais de reciclagem, o que faz do comércio de resíduos um mecanismo de alocação de material entre países com diferentes capacidades de processá-lo. A China foi o centro dessa alocação, absorvendo cerca de 45% do volume mundial de resíduos plásticos importados desde 1992 (Brooks et al., 2018) e figurando como o maior importador individual de sucata de alumínio. A concentração em um único destino configurou vulnerabilidade estrutural em 2018, quando a *National Sword* reduziu o teto de contaminação de até 3% para 0,5% em 24 categorias de resíduos sólidos e interrompeu as importações de plásticos mistos e papéis de baixa qualidade (WTO, 2017).

A relevância do tema está nas consequências ambientais do redirecionamento dos fluxos provocado pela política chinesa, que gera consequências ambientais diretas e desiguais entre países. Quando o resíduo plástico deixa de ser absorvido por um destino e passa a ser dirigido a jurisdições de fiscalização frágil, o material tende ao descarte inadequado, à queima a céu aberto ou ao acúmulo, com externalidades locais que recaem sobre populações de menor renda (Brooks, Wang, & Jambeck, 2018; Cottom, Cook, & Velis, 2024; Pathak et al., 2024). Compreender o que governa a direção desses fluxos, portanto, não é questão apenas de comércio, mas de política ambiental e de justiça distributiva entre países exportadores e receptores de resíduo. Esse é o contexto das revisões regulatórias em curso: as emendas plásticas da Convenção de Basileia, vigentes desde 2021, incluíram os resíduos plásticos mistos e contaminados no procedimento de consentimento prévio informado, que condiciona o movimento transfronteiriço desses resíduos à autorização expressa do país importador (Basel Convention, 2019). O Regulamento (UE) 2024/1157, relativo a transferências de resíduos, vai além e proíbe a exportação de resíduos plásticos para países não pertencentes à OCDE a partir de novembro de 2026, admitindo-a apenas quando o país de destino demonstrar capacidade de gestão ambientalmente adequada do material (União Europeia, 2024). Essas regras estão sendo redesenhadas sem que se saiba se uma regulação única serve a materiais de estruturas econômicas distintas.

Avaliar essa questão interessa a três públicos, o primeiro são os organismos multilaterais, que revisam as regras de resíduos, como a Convenção de Basileia. Para esses agentes, importa saber se um mesmo critério de controle serve a materiais distintos ou se a disciplina deve variar conforme a estrutura de mercado, pois regras uniformes podem não alcançar o material que pretendem governar. O segundo são os governos dos países exportadores, sobretudo os que dependiam do mercado chinês, que precisam antecipar para onde seus resíduos migrarão após um choque, a fim de dimensionar a necessidade de capacidade interna de tratamento. O terceiro são os países receptores de menor renda, que absorvem o resíduo redirecionado e necessitam de fundamentação técnica para criar restrições próprias sem que estas sejam interpretadas como barreira comercial. Ao testar a hipótese de que o plástico é redirecionado por permissividade regulatória e o alumínio por capacidade de processamento, o estudo oferece a esses três públicos um critério de avaliação baseado na capacidade verificada de processamento do destino. Esse critério substitui a divisão binária entre países desenvolvidos e em desenvolvimento que hoje estrutura parte da regulação. É o caso da Emenda de Banimento da Convenção de Basileia, que proíbe os países do Anexo VII, essencialmente os membros da OCDE, da União Europeia e Liechtenstein, de exportar resíduos perigosos para os países fora desse grupo (Basel Convention, 1995; União Europeia, 2024).

A literatura de comércio e meio ambiente documenta a hipótese do paraíso da poluição (Copeland e Taylor, 1994; Cole, 2004), segundo a qual diferenças de custo regulatório geram vantagem comparativa que redireciona atividades poluentes para países de menor rigor, e a hipótese concorrente da especialização eficiente (Porter e van der Linde, 1995), postula que o fluxo se dirige a quem tem capacidade técnica de extrair valor do material, independentemente da regulação. O que permanece em aberto não é a existência de cada mecanismo, mas a questão de qual predomina em cada material e por quê. A dificuldade é de identificação, pois parte dos estudos estima um coeficiente comum para resíduos agregados, o que mistura materiais de lógicas opostas; outra parte analisa um único material isoladamente, sem um termo de comparação que permita separar o efeito da regulação das tendências gerais do comércio (Kellenberg, 2012;

D'Amato et al., 2012; Pothen e Hundt, 2024). Sem essa separação, não se sabe se a resposta observada decorre da assimetria regulatória ou das características econômicas próprias do material.

Este trabalho parte dessa dificuldade de identificação ao comparar resíduos plásticos e sucata de alumínio no período de 2010 a 2023, dois materiais escolhidos por ocuparem extremos opostos do espectro de valor e de intensidade tecnológica de processamento. O questionamento que norteia esse estudo é se a assimetria regulatória ambiental e a capacidade de processamento do importador determinam os fluxos bilaterais de forma estruturalmente distinta entre os dois materiais, e qual o efeito causal da *National Sword* sobre esse comércio. O objetivo geral é investigar essa determinação diferenciada e identificar o ajustamento causado pelo choque de 2018. Especificamente, busca-se estimar o efeito da assimetria regulatória sobre os fluxos de cada material; estimar o efeito da capacidade de processamento e testar se este canal domina o da regulação de forma distinta entre os materiais; identificar por tripla diferença o efeito causal da *National Sword* sobre o volume exportado; e comparar a composição regulatória e de capacidade dos destinos que absorveram os fluxos redirecionados.

Quatro hipóteses orientam a análise, cada uma derivada de um dos dois mecanismos teóricos opostos: i) a assimetria regulatória tem efeito positivo sobre os fluxos de plástico, em linha com o paraíso da poluição; ii) a capacidade de processamento é o determinante principal dos fluxos de alumínio, em linha com a especialização eficiente; iii) para o plástico, o efeito da regulação diminui à medida que cresce a capacidade de processamento do destino, o que reconcilia o paraíso da poluição com a versão condicional em que a atratividade da permissividade depende de o destino ter ou não, alternativa econômica de processar o material; iv) a *National Sword* redirecionou o plástico para destinos de menor capacidade e regulação mais frouxa, sem afetar o alumínio.

A contribuição não está em mostrar que os dois materiais respondem a mecanismos distintos, o que a teoria já antecipa, mas em demonstrar essa distinção com identificação causal, usando um material como contrafactual do outro sob o mesmo choque. O desenho de tripla diferença permite atribuir as diferenças de resposta às características dos materiais, e não a diferenças de amostra, período ou conjuntura, o que distingue este trabalho da literatura que acompanha o efeito da *National Sword* sobre o plástico sem um bem de comparação. Os resultados têm implicações para o desenho das regras internacionais de resíduos, ao sugerir que o critério relevante para o controle de exportações é a capacidade de processamento do destino, e não a classificação binária entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Após essa introdução, apresenta-se o referencial teórico, que desenvolve as hipóteses e subsidia a interpretação dos resultados. Em seguida, são apresentados a metodologia, os dados utilizados, os resultados dos dois modelos e da análise da composição dos destinos. Na última seção, apresentam-se as considerações finais.

2. Referencial teórico

Esta seção fundamenta as quatro hipóteses, são apresentados os dois mecanismos teóricos concorrentes, as estruturas de mercado do alumínio e do plástico, e situa a literatura sobre o *National Sword* que motiva o desenho de identificação.

2.1 Hipótese do paraíso da poluição e especialização eficiente

A hipótese do paraíso da poluição deriva da teoria do comércio com custos ambientais heterogêneos (Copeland e Taylor, 1994). Quando países diferem no rigor da regulação ambiental, o custo de produzir ou processar bens poluentes é menor nas jurisdições permissivas, o que gera vantagem comparativa e desloca essas atividades para esses locais. No comércio de resíduos, o argumento prevê que materiais de baixo valor, cujo processamento impõe externalidades locais, tendem a fluir para destinos de menor exigência regulatória, onde podem ser reciclados de forma informal ou acumulados sem tratamento adequado (Baggs, 2009; Kellenberg e Levinson, 2014). O diferencial regulatório entre origem e destino é, nessa perspectiva, o principal determinante do comércio, e a previsão é de que a assimetria regulatória exerça efeito positivo sobre o fluxo.

Em contraposição à hipótese do paraíso da poluição, Porter e van der Linde (1995) sustentam que a regulação rigorosa não necessariamente afasta a atividade, podendo estimular eficiência e inovação. Aplicada ao comércio de resíduos, essa perspectiva sugere que o fluxo se dirige a países com maior

capacidade técnica de extrair valor do material, independentemente do rigor regulatório, em um padrão de especialização eficiente. Aqui o determinante é a dotação de capital e tecnologia do destino, não o diferencial de regulação, e a previsão é de que a capacidade de processamento, e não a assimetria regulatória, governe o fluxo.

Os dois mecanismos não são mutuamente exclusivos, e o argumento deste estudo consiste em reconhecer que o predomínio de cada um depende das características do material. Um resíduo cujo processamento gera pouco valor e muita externalidade, como o plástico, tende a seguir o paraíso da poluição, porque a decisão de recebê-lo é governada pelo custo de tolerá-lo, que é menor onde a regulação é frouxa. Um resíduo cujo processamento gera valor econômico e exige tecnologia, como o alumínio, tende a seguir a especialização eficiente, porque a decisão de recebê-lo é governada pela capacidade de transformá-lo em insumo de alto valor.

2.2 Estruturas de mercado e a forma condicional

A sucata de alumínio integra um mercado de commodities secundárias estabelecido, apenas uma minoria dos metais atinge taxas elevadas de reciclagem ao fim da vida útil, e o alumínio está entre eles, com preços de referência cotados na *London Metal Exchange* (Graedel et al., 2011). A sua reciclagem recupera cerca de 95% da energia empregada na produção primária, o que confere à sucata valor econômico próprio e demanda industrial estável. O processamento exige fundição em escala, o que concentra a atividade em países com parque metalúrgico instalado (Capuzzi e Timelli, 2018). Nesse contexto, o diferencial entre o preço do metal primário e o da sucata define a atratividade do destino, e a decisão de exportar responde à capacidade do parceiro, mecanismo que Kellenberg (2012) associa à determinação pelo mercado de commodities secundárias. A previsão para o alumínio é, portanto, de especialização eficiente, o que fundamenta a segunda hipótese.

Os plásticos apresentam o quadro inverso, pois combinam baixo valor de recuperação, processamento intensivo em mão de obra, sensível ao custo do trabalho e ao relaxamento dos padrões ambientais, alta heterogeneidade de qualidade e contaminação. A degradação das propriedades do polímero a cada ciclo, a incompatibilidade entre plásticos misturados e a contaminação por rótulos, resíduos e aditivos reduzem a qualidade e o valor de mercado do material reciclado e exigem etapas custosas de triagem (Hahladakis et al., 2018; Jiang & Bateer, 2025). Como consequência, uma fração elevada do resíduo plástico comercializado não é reciclável de forma economicamente viável e termina em aterro, incineração ou descarte informal no destino: em escala global, apenas cerca de 9% do plástico descartado foi reciclado em 2019, ante 19% incinerado, quase 50% depositado em aterro e 22% em descarte descontrolado (OECD, 2022). Esse padrão aproxima a decisão de importar plástico de uma decisão sobre tolerar externalidade, e não sobre adquirir insumo. As características do material reduzem o papel da capacidade técnica e aumentam o do diferencial regulatório, o que aproxima o plástico do mecanismo do paraíso da poluição. O contraste entre os dois materiais gera previsões opostas e testáveis, que o desenho de estimação explora.

A terceira hipótese exige um passo teórico adicional, que também prepara a interpretação de um dos resultados mais discutidos deste estudo. A previsão do paraíso da poluição, de que a permissividade regulatória atrai o resíduo, não vale de forma uniforme entre destinos, e sim de forma condicionada à capacidade de cada um. Considere dois destinos igualmente permissivos: um com parque de reciclagem instalado e outro sem. No primeiro, o resíduo plástico é atraído por razão econômica, porque há quem o transforme em insumo, e a permissividade regulatória é secundária. No segundo, o resíduo só é atraído se a permissividade compensar a ausência de uso produtivo, isto é, se receber o material sem tratá-lo for barato o bastante. O efeito da regulação sobre o fluxo é, por essa razão, mais forte nos destinos de baixa capacidade, onde a permissividade é a única razão para receber o material, e mais fraco nos de alta capacidade, onde a razão econômica domina.

Essa forma condicional tem duas consequências: o efeito da regulação não é um número único, e sim uma função do nível de capacidade do destino, de modo que sua interpretação exige o cálculo do efeito em diferentes níveis de capacidade, e não a interpretação de um coeficiente isolado. A segunda é que o parâmetro que capta essa dependência, a interação entre regulação e capacidade, mede a inclinação dessa função, ou seja, quão rápido o efeito da regulação decresce conforme a capacidade aumenta, e não se a regulação atrai ou repele o material em um dado ponto. Confundir a inclinação com o efeito é a origem de

boa parte das dúvidas de interpretação em modelos com interação de variáveis contínuas, ponto retomado na metodologia e nos resultados. Hu et al. (2020) formalizam uma versão dessa relação condicional, mostrando que, acima de um limiar de capacidade, o rigor do importador pode maximizar a absorção de resíduos de valor, o que implica relação não monotônica entre regulação e fluxo.

2.3 Comércio de resíduos, choques regulatórios e o contrafactual

A literatura sobre choques relacionados ao comércio de resíduos concentra-se no *National Sword*. Brooks et al. (2018) discutem a reconfiguração do comércio global de plástico após 2018, com queda acentuada das importações chinesas e redistribuição para o Sudeste Asiático. Estudos posteriores registram o deslocamento em direção a destinos de menor exigência, os chamados refúgios de resíduos.Wang et al. (2020) mapeiam a redistribuição dos fluxos de plástico da Europa e da América do Norte para o Sudeste Asiático após a política, Shi et al. (2021) documentam crescimento superior a 100% nas importações de resíduo da região no período seguinte ao choque, e Liu et al. (2022) analisam a reconfiguração da rede mundial de comércio de plástico provocada pela medida. Um padrão semelhante já aparece em menor escala durante o *Green Fence*, operação temporária de endurecimento das inspeções alfandegárias chinesas iniciada em fevereiro de 2013, que reduziu as importações de plástico contaminado e antecipou, em escala reduzida, os efeitos observados a partir de 2018 (Brooks et al., 2018). Entretanto, a maior parte desses estudos acompanha o plástico isoladamente, o que impede separar o efeito da política das tendências gerais do comércioUma queda nas exportações de plástico após 2018 pode refletir tanto o fechamento chinês quanto uma desaceleração global do comércio ou um evento macroeconômico que atingiria qualquer material.

A superação dessa limitação exige um contrafactual, ou seja, uma medida do que teria acontecido com o plástico se a política não existisse. Por essa razão, a estrutura comparativa adotada no trabalho é necessária para a análise dos efeitos da política. Um bom contrafactual precisa ter passado pelo mesmo período e pelos mesmos choques gerais que o plástico, sem ter sofrido a política. A sucata de alumínio cumpre esse papel porque a China seguiu importando alumínio depois de 2018, de modo que o comércio do material esteve presente no mesmo intervalo, foi exportado por praticamente os mesmos países e esteve sujeito às mesmas condições gerais de comércio, sem ter sido alcançado pela restrição. A trajetória do alumínio e do plástico estiveram sujeitas às mesmas tensões comerciais, variações de frete e desaceleração global, a diferença que separa os dois fluxos de exportação é o efeito da política. Essa é a lógica que embasa a quarta hipótese e o desenho de identificação detalhado na metodologia.

2.4 Fluxos comerciais e modelo gravitacional

A equação gravitacional é a estrutura padrão para analisar os determinantes do comércio bilateral desde sua fundamentação teórica em Anderson e van Wincoop (2003), que mostraram que os fluxos dependem não dos custos absolutos entre dois países, mas dos custos relativos à resistência multilateral de cada um, isto é, à média dos custos comerciais que cada país enfrenta com todos os seus parceiros. Aplicada a resíduos, o modelo gravitacional capta que a decisão de exportar um material para um destino depende do custo de comerciá-lo com esse destino frente ao custo de comerciá-lo com todos os outros. Kellenberg (2012) estima que a deterioração da regulação de um país frente à de seu parceiro eleva suas importações de resíduo, conclusão que sustenta o padrão de refúgio de resíduos e que se soma ao efeito usual do gravitacional, no qual a distância reduz o fluxo e o tamanho das economias o amplia.

Outros estudos que examinaram especificamente o comércio de plástico confirmam esse padrão e mostram que o *National Sword* o intensificou, com o diferencial de renda per capita dirigindo os fluxos bilaterais tanto antes quanto depois do banimento (Wang et al., 2020; Shi et al., 2021). O papel da regulação, contudo, não é uniforme entre materiais: para resíduos de maior valor de recuperação, como escórias e sucata metálica, encontra-se o padrão inverso, com o material fluindo para países de renda alta, em contradição com a previsão do paraíso da poluição (Kellenberg, 2012). Pothen e Hundt (2024) ampliaram essa interpretação com atenção ao papel dos acordos ambientais na atenuação ou no reforço do redirecionamento.

Nenhuma dessas contribuições isolou, de forma causal, a diferença de resposta entre materiais a um mesmo choque regulatório. Os estudos que estimam determinantes do comércio de resíduo o fazem sobre

um coeficiente comum, que mistura materiais de estruturas econômicas opostas, ou analisam um único material, sem um termo de comparação que separe o efeito da regulação das condições gerais do comércio. Os estudos que tratam do *National Sword* acompanham o plástico isoladamente, sem um contrafactual que revele o que teria ocorrido na ausência da política. É essa distinção que a presente pesquisa se apoia, comparando dois materiais de estruturas opostas sob o mesmo choque. A contribuição para o estado da arte ocorre em dois pontos, introduzindo a interação entre assimetria regulatória e capacidade de processamento, que permite testar se os dois mecanismos concorrentes operam de forma distinta entre materiais, algo que a estimação de um coeficiente comum não alcança. O segundo ponto é o uso da estrutura gravitacional não como fim, mas como uma das duas vertentes de uma estratégia que combina a interpretação de determinantes em condições normais com a identificação causal de um choque, de modo que o modelo gravitacional fornece o mecanismo e a tripla diferença fornece a prova de que esse mecanismo governa a resposta à política.

3. Metodologia

Esta seção descreve a base de dados e a construção de cada variável, apresenta a equação gravitacional, detalha a estratégia de tripla diferença com a lógica do contrafactual e a álgebra da identificação, e fecha com o exercício de composição de destinos e as estatísticas descritivas.

3.1 Modelo gravitacional

A unidade de observação é o fluxo bilateral do material k do país exportador i para o importador j no ano t, no período de 2010 a 2023. O recorte de materiais compara a sucata de alumínio, código 760200 do Sistema Harmonizado, com quatro categorias de resíduos plásticos, os códigos 391510, 391520, 391530 e 391590. Essas quatro linhas correspondem à parcela dos resíduos plásticos efetivamente transacionada e alcançada pela restrição chinesa de 2018.[1]

A cobertura de países segue um critério de materialidade: para cada material, retêm-se, em ordem decrescente de participação, os mercados que respondem por ao menos 95% do valor global do comércio do produto no período. O corte resulta em 48 exportadores e 29 importadores para o plástico e em 55 exportadores e 29 importadores para o alumínio. A seleção completa consta do Anexo A.

Os valores de comércio provêm da *UN Comtrade*, em dólares correntes[2]. Embora o modelo gravitacional seja habitualmente estimado sobre os fluxos declarados pelo exportador, adota-se o valor das importações por serem mais confiáveis, pois o país receptor tem maior incentivo a registrar a entrada, para controle alfandegário. As reexportações via Hong Kong e Macau, entrepostos da China, são identificadas e excluídas em verificação de robustez.

Os dados de comércio de resíduos apresentam duas limitações. A classificação como resíduo depende da declaração aduaneira, e parte do material pode ser registrada sob códigos de produto usado ou matéria-prima secundária, o que subestima o volume efetivo. . Além disso, assume-se a possibilidade de haver comércio ilegal de resíduos, mas estes fluxos não estão disponíveis a partir dos registros oficiais. Essas limitações recomendam cautela na interpretação dos níveis, mas afetam menos a identificação, que se apoia na variação relativa entre materiais e no tempo, e não nos níveis absolutos.

O diferencial bilateral de rigor regulatório é definido como a diferença entre o indicador do exportador e o do importador $\Delta RQ_{ijt} = RQ_{it} - RQ_{jt.}$, ambos extraídos da dimensão de qualidade regulatória dos *Worldwide Governance Indicators* (WGI)[3] do Banco Mundial. Valores positivos identificam pares em que a origem é mais regulada que o destino, situação sob a qual a hipótese do paraíso da poluição prevê fluxo. O indicador entra em nível, e não em transformação não linear, porque nessa forma é separável entre os

[1] As quatro categorias de plástico correspondem a desperdícios, aparas e fragmentos de polímeros de etileno, de estireno, de cloreto de vinila e de outros plásticos, que cobre os resíduos plásticos efetivamente comercializada e sujeita à restrição chinesa.
[2] No modelo gravitacional, os efeitos fixos de ano absorvem a variação comum do nível de preços em cada período, e na tripla diferença os efeitos fixos de produto por ano absorvem inclusive variações de preços relativos entre os materiais, tornando a deflação redundante.
[3] O indicador de qualidade regulatória usado aqui sintetiza fontes primárias de percepção. Sua vantagem é a cobertura ampla e comparável entre países e anos, o que viabiliza o diferencial bilateral em um painel longo. Sua limitação é ser medida de rigor regulatório geral, não específica da regulação ambiental, mas na ausência de um indicador melhor, este é utilizado como *proxy*.

componentes do exportador e do importador, o que garante que os efeitos fixos de origem e de destino absorvam corretamente cada parcela e deixem identificada apenas a assimetria bilateral.

A capacidade de processamento do importador é uma *proxy* dada pela variável *Domestic Material Input* (DMI_{jt}), extraída da base *Global Material Flows Database* da UNEP, que mede a quantidade física de material efetivamente utilizada pela economia do país, somando a extração interna e as importações do material. A escolha dessa medida, e não de indicadores de renda ou de abertura comercial, apoia-se no argumento de que a decisão de importar resíduo responde à existência de parque produtivo capaz de absorver e transformar o material, e não à demanda nominal do país. O que determina se um destino consegue aproveitar o resíduo como insumo é a escala física de material que sua economia já processa, e é isso que a variável DMI_{jt} capta ao registrar o volume de material que entra no sistema produtivo. Como a etapa de processamento é a mesma para o material primário e para o secundário, o volume total processado pela economia é uma aproximação realista da capacidade instalada de tratar o resíduo. Para o alumínio, o indicador corresponde ao consumo doméstico aparente de produtos metálicos; para o plástico, ao consumo de material polimérico. A variável entra em logaritmo natural, de modo que seu coeficiente é uma elasticidade e sua escala se torna comparável entre países de tamanhos distintos.

A tarifa bilateral aplicada ao material provém da base TRAINS, na forma da alíquota efetivamente aplicada. Entra na equação como $\ln(1 + \tau_{ijkt})$, transformação que preserva as observações de tarifa zero e lineariza o efeito proporcional do custo tarifário. A variável APC_{ijt} indica a existência de acordo comercial com provisões ambientais entre o exportador e o importador. Sua construção parte da base TREND (*Trade and Environment Database*), que codifica o conteúdo ambiental dos acordos comerciais (Morin, Dür & Lechner, 2018). Para cada par de países e ano, a variável APC_{ijt} assume valor igual a 1 quando o acordo em vigor entre as partes contempla ao menos uma provisão relacionada à gestão e reciclagem de resíduos domésticos, às restrições à exportação, importação ou transporte de resíduos perigosos ou a outras normas sobre resíduos perigosos, como regras de gestão, disposição, recuperação e liberalização do setor, assumindo valor 0 nos demais casos.

A determinação dos fluxos comerciais é estimada por um modelo gravitacional na forma estrutural derivada por Anderson e van Wincoop (2003), em que o comércio bilateral depende das características de origem e destino e de termos de resistência multilateral, representados empiricamente por um conjunto de efeitos fixos. A estimação emprega o estimador *Poisson Pseudo Maximum Likelihood* (PPML), por duas razões. A primeira é o tratamento dos pares sem comércio: o procedimento log-linear tradicional (mínimos quadrados ordinários, MQO) descarta todos os fluxos nulos, pois o logaritmo de zero não existe, e esses pares são numerosos e informativos, já que um par sem comércio de plástico pode ser justamente o resultado que a política produziu, de modo que omiti-lo introduz viés de seleção e descarta a informação da margem extensiva, a decisão de comerciar ou não. A segunda é que, sob heterocedasticidade, a esperança do logaritmo do erro depende dos regressores, e a transformação logarítmica gera estimativas viesadas e inconsistentes, resultado demonstrado por Santos Silva e Tenreyro (2006) e consolidado na prática de gravidade por Larch, Shikher e Yotov (2025). O PPML contorna ambos os problemas, pois estima a equação em nível, o que acomoda os zeros, e produz estimativas consistentes sob formas gerais de heterocedasticidade, exigindo apenas a correta especificação da média condicional. A especificação principal é a equação (1):

$$X_{ijkt} = \exp\left[\beta_1 \Delta RQ_{ijt} + \beta_2 \ln DMI_{jkt} + \beta_3 \left(\Delta RQ_{ijt} \times \ln DMI^{c}_{jkt}\right) + \beta_4 \ln\left(1 + \tau_{ijkt}\right) + \beta_5 APC_{ijt} + \mu_{ikt} + \nu_{jk} + \varphi_{ij}\right] \varepsilon_{ijkt} \quad (1)$$

em que X_{ijkt} é o valor exportado do material k do país i para o país j no ano t, modelado como a exponencial de uma combinação linear dos regressores multiplicada pelo termo de erro; ΔRQ_{ijt} é o diferencial de qualidade regulatória e $\ln DMI_{jkt}$ a capacidade de processamento do importador. A interação entre os dois $\left(\Delta RQ_{ijt} \times \ln DMI^{c}_{jkt}\right)$ é o objeto principal da primeira parte da análise, pois testa se o efeito da regulação sobre o fluxo depende da capacidade do destino. As demais variáveis são a tarifa e o indicador de acordo com provisão ambiental.

A estrutura de efeitos fixos (EFs) é definida de modo a identificar as variáveis de interesse sem que sejam absorvidas pelos próprios controles, e cada termo cumpre uma função. O termo μ_{ikt} representa o EF de exportador-produto-ano, que captura tudo o que varia por país de origem, material e período, como a oferta interna de resíduo, a política comercial da origem e choques anuais específicos a cada exportador; ν_{jk} é o EF de importador-produto, que absorve o nível médio de atratividade de cada destino para cada material; e φ_{ij} é o EF de par bilateral, que remove tudo o que é constante na relação entre os dois países, como distância, língua comum, fronteira e laços históricos de comércio. Com essa combinação, o diferencial regulatório é identificado a partir de sua variação temporal dentro de cada par, e não de diferenças permanentes entre pares, o que reduz o risco de que uma correlação espúria entre regulação e comércio conduza a estimativa.

Por motivo de interpretação, a capacidade de processamento entra no termo de interação centralizada na média de cada material, isto é, de cada valor subtrai-se a média do logaritmo da capacidade daquele material. Em um modelo com interação, o coeficiente do diferencial regulatório isolado mede o efeito da regulação no ponto em que a capacidade vale zero, pois é aí que o termo de interação se anula. Esse ponto, porém, não descreve nenhum país real, já que todas as economias processam algum volume de material e nenhuma tem capacidade zero. A centralização desloca esse ponto de referência para a capacidade média da amostra, de modo que o coeficiente passa a medir o efeito da regulação em um destino típico, o que faz mais sentido econômico. Em termos operacionais, de cada valor subtrai-se a média do logaritmo da capacidade dentro do material, indicada pelo sobrescrito *c*. A centralização não altera o coeficiente da interação nem o ajuste do modelo, mas muda a interpretação do coeficiente do diferencial regulatório isolado: em vez de medir o efeito da regulação em um destino de capacidade zero, passa a medi-lo no destino de capacidade média da amostra (Aiken e West, 1991). Como no PPML a variável dependente permanece em nível, os coeficientes das variáveis em logaritmo são elasticidades e os das variáveis em nível, como o diferencial regulatório, são semielasticidades, o que resulta na variação percentual do fluxo por unidade da variável.

Para interpretar a interação de duas variáveis contínuas, ponto antecipado no referencial e retomado nos resultados, o efeito total do diferencial regulatório sobre o fluxo não é dado pelo coeficiente do diferencial isolado nem pelo da interação, mas pela derivada do fluxo em relação ao diferencial, que soma os dois termos, conforme a equação (2):

$$\frac{\partial \ln X_{ijkt}}{\partial\, \Delta RQ_{ijt}} = \beta_1 + \beta_3 \ln DMI^{c}_{jkt} \qquad (2)$$

Com isso, o coeficiente da interação mede apenas a inclinação, ou seja, quanto o efeito da regulação muda quando a capacidade do destino aumenta em uma unidade, e não informa se, em um dado nível de capacidade, a regulação atrai ou repele o comércio. Como a terceira hipótese afirma que esse efeito depende do nível de capacidade, sendo maior nos destinos que não têm parque para absorver o material e menor nos que têm, testá-la exige avaliar o efeito da regulação separadamente em destinos de baixa, média e alta capacidade. Para isso, a análise reporta o efeito marginal do diferencial regulatório em três pontos da distribuição de capacidade, o percentil 25 (baixa capacidade), a mediana (média) e o percentil 75 (alta). A opção por percentis, e não por valores fixados a priori, mantém a avaliação em pontos que existem na amostra, o que evita interpretar o efeito em níveis de capacidade sem correspondência nos dados. Os erros padrão de cada efeito marginal são obtidos pelo método delta.

Estima-se, ainda, uma especificação alternativa, a especificação B, que substitui o EF de importador-produto por importador-produto-ano, absorvendo qualquer choque anual específico ao destino. A comparação entre as duas especificações é informativa e, no caso do plástico, produz um resultado que exige interpretação cuidadosa, detalhada na seção de resultados: como o plástico tem produto único, o EF de importador-produto-ano equivale a um EF de importador-ano e absorve quase toda a variação da capacidade de processamento, de modo que a interação estimada na especificação B mede uma quantidade distinta da estimada na especificação A. A especificação A é a que testa a hipótese, por preservar a variação da capacidade de que a interação depende, e a especificação B serve para verificar a robustez dos efeitos que não dependem dessa variação.

A estrutura de EFs da especificação B cria uma dificuldade específica para a identificação do efeito próprio da capacidade de processamento. Como a capacidade varia no nível de importador-ano, a inclusão de um EF de mesma dimensão absorveria toda a variação da capacidade e impossibilitaria estimar seu coeficiente diretamente. Para contornar essa limitação e recuperar o efeito da capacidade sob a estrutura saturada, adota-se uma estimação em duas etapas, em linha com Larch, Shikher e Yotov (2025).

Na primeira etapa, estima-se por PPML a equação gravitacional com o conjunto completo de EFs, incluindo o de importador-produto-ano, e recupera-se o valor estimado desse EF, que sintetiza toda a atratividade de cada importador para cada material em cada ano, líquida das demais variáveis. Na segunda etapa, a base é agregada a uma observação por importador-ano e o EF recuperado entra como variável dependente de uma regressão por MQO sobre o logaritmo da capacidade de processamento, com EF de ano e erros padrão agrupados no importador. O agrupamento no importador acompanha o nível em que o regressor varia e evita a subestimação do erro padrão que resultaria de tratar cada fluxo bilateral como observação independente. O sinal e a significância do coeficiente da capacidade nessa segunda etapa determinam, para cada material, se destinos de maior capacidade instalada são efetivamente mais atrativos, resultado que a especificação saturada não permitiria obter em etapa única. O Anexo B reporta a estimação em duas etapas do efeito da capacidade.

A inferência considera a estrutura de dependência dos dados e, no modelo gravitacional, os erros padrão são agrupados por par bilateral, o que acomoda a correlação serial dos fluxos de um mesmo par ao longo do tempo. Na tripla diferença, o agrupamento é por exportador, nível em que se dá a variação do tratamento, o que evita subestimar os erros diante da correlação entre materiais e anos de um mesmo país.

3.2 Estimador de tripla diferença

A segunda parte da análise identifica o efeito causal do *National Sword*, um desenho de diferenças em diferenças compara a variação da variável de interesse em um grupo afetado pela política com a variação em um grupo não afetado, sob a hipótese de que o grupo de controle revela como os tratados teriam se comportado na ausência da intervenção, desde que ambos seguissem trajetórias paralelas antes do choque. A qualidade da inferência, neste caso, depende inteiramente da qualidade do contrafactual, e é por isso que sua escolha recebe aqui tratamento detalhado.

O *National Sword* qualifica-se como experimento quase-natural porque sua origem e seu desenho o tornam exógeno ao comércio dos parceiros. A medida foi decisão unilateral do governo chinês, motivada por objetivos internos de qualidade ambiental, e não por variáveis do comércio dos países exportadores. O intervalo entre o anúncio, em julho de 2017, e a vigência, em janeiro de 2018, foi curto demais para adaptação, e o novo teto de contaminação de 0,5% tornou o ajuste técnico inviável para a maioria dos exportadores no prazo dado. O choque, ainda assim, não atingiu todos por igual: sua intensidade variou conforme o quanto cada país dependia do mercado chinês antes de 2018, e é essa variação de dependência que fornece os graus distintos de tratamento entre exportadores.

A sucata de alumínio é um bom contrafactual por um conjunto de razões que respondem diretamente à objeção de que dois materiais não seriam comparáveis. A mais importante é que ela não foi incluída no *National Sword*: a China seguiu importando alumínio depois de 2018, ao contrário dos resíduos de menor valor, cujas exportações para o país foram interrompidas, de modo que o alumínio percorreu o mesmo período sem sofrer a política. Soma-se a isso o fato de os dois materiais serem exportados, em grande parte, pelos mesmos países, o que faz com que qualquer fator incidente sobre um exportador como um todo, como a desaceleração do comércio mundial, as tensões comerciais de 2018 ou variações no custo de frete, atinja plástico e alumínio ao mesmo tempo e se cancele na comparação entre eles. A esses dois pontos junta-se a semelhança de comportamento em tempos normais, pois ambos são resíduos comercializáveis sujeitos a demanda industrial e a custos de transporte. É a combinação desses elementos, o mesmo choque ausente em um dos materiais, os mesmos exportadores e a mesma lógica de comércio, que permite usar o alumínio como referência do que teria acontecido com o plástico se a política não existisse.

Apesar dos argumentos apresentados, objeções ainda podem surgir quanto ao uso do alumínio como contrafactual, uma é que plástico e alumínio teriam elasticidades-renda distintas, de modo que uma expansão global da demanda os afetaria de forma desigual e quebraria o paralelismo; o efeito fixo de produto-ano neutraliza essa preocupação, pois absorve qualquer choque que atinja um material em um dado

ano do mercado mundial, inclusive uma expansão da demanda global movida por renda, e o que permanece identificado é a resposta diferencial dos dois materiais dentro do mesmo exportador, não alcançada por um choque comum ao material. Outra objeção é que o alumínio poderia ter sofrido um choque próprio no período, alheio à política sobre o plástico, capaz de contaminar a comparação. O candidato mais provável é o banimento total de importação de resíduos sólidos decretado pela China em 2021[4]. Essa medida, porém, tratou a sucata metálica de forma distinta do demais resíduos, ao reclassificá-la como matéria-prima secundária de importação permitida, de modo que a sucata de alumínio não foi interrompida como o plástico havia sido. Seu efeito sobre a comparação, se existente, é comprimir o diferencial entre os materiais nos biênios finais, o que atenua o coeficiente estimado e torna o resultado conservador em vez de inflá-lo. Resta a objeção de que a escolha do alumínio seria arbitrária frente a outros materiais poupados pela política, e a ela responde o placebo de produto com minério de ferro e cobre, que mostra que materiais igualmente fora da lista de resíduos vedados não exibem o padrão de queda, o que indica que o resultado do plástico não é artefato da comparação com um metal qualquer, mas a resposta específica do material atingido.

O contrafactual não pressupõe que plástico e alumínio sejam idênticos, o que seria falso, mas que a diferença entre eles teria permanecido estável caso a política não existisse, hipótese que os coeficientes anteriores do estudo de eventos permitem verificar. O desenho não exige que os dois materiais tenham o mesmo nível de comércio, apenas que a distância entre eles não se alterasse por razões alheias ao choque, condição menos restritiva e sustentada pelos dados.

A intensidade do tratamento de cada país é medida pela participação da China no destino de suas exportações de cada material no período anterior ao choque, definida na equação (3):

$$Share_{i,k} = \frac{\sum_{t=2010}^{2016} X_{i,CHN,t,k}}{\sum_{t=2010}^{2016} \sum_{j} X_{i,j,t,k}} \tag{3}$$

O numerador é o valor do bem k exportado pelo país i para a China, somado sobre os anos de 2010 a 2016[5], e o denominador é o total de k exportado por i para todos os importadores j no mesmo período, de modo que o $Share_{i,k}$ mede a fração das exportações de cada material que teve a China como destino. Um país com participação elevada tinha no mercado chinês um comprador relevante para aquele material e ficou mais exposto ao fechamento. O *share* é uma característica de cada exportador, calculada uma única vez por país e material, e entra na tripla diferença multiplicado pela *dummy* de plástico, que restringe o efeito ao material atingido. A especificação principal da tripla diferença compara a trajetória do plástico com a do alumínio dentro do mesmo exportador e do mesmo ano, entre países com diferentes intensidades de dependência prévia do mercado chinês (Olden e Møen, 2022):

Para a tripla diferença, o painel bilateral é agregado ao nível de exportador-material-ano, somando-se o valor exportado por cada país em cada material a cada ano sobre todos os destinos. Essa agregação transforma a base bilateral em um painel de exportadores, no qual a unidade de comparação passa a ser o total exportado de cada material, e não mais o fluxo par a par. A amostra da tripla diferença herda os exportadores da seleção de 95% de cada material, e o desenho exige que o mesmo exportador esteja presente nos dois materiais, de modo que a comparação entre plástico e alumínio ocorra dentro de cada país. Os exportadores sem contrapartida nos dois materiais são omitidos pelos efeitos fixos de exportador-material, sem prejuízo da identificação, que se apoia na variação intra-exportador entre os dois materiais.

$$\ln Y_{ikt} = \alpha + \delta \left(Share_{i,k} \times Post_t \times Product_{plastic}\right) + \gamma_{ik} + \lambda_{kt} + \psi_{it} + \varepsilon_{ikt} \tag{4}$$

em que Y_{ikt} é o logaritmo do valor exportado do material k pelo país i no ano t, $Share_i$ é a intensidade do tratamento, $Post_t$ indica o período posterior a 2018 e $Product_{plastic}$ é uma variável binária que vale 1 para

[4] Em vigor a partir de 1º de janeiro de 2021, o banimento consolidou as restrições iniciadas com o *National Sword* e proibiu a importação de resíduos sólidos pela China, com base na revisão da Lei de Prevenção e Controle da Poluição Ambiental por Resíduos Sólidos, adotada em abril de 2020 (China, 2020). A sucata metálica recebeu tratamento próprio: a China estabeleceu padrões nacionais para matérias-primas metálicas secundárias, de modo que o alumínio e outros metais que atendem a esses padrões seguiram sendo importados como insumo, e não como resíduo.

[5] O *National Sword* foi anunciado em julho de 2017 e entrou em vigor em janeiro de 2018. Entre o anúncio e a vigência os exportadores já podiam ter começado a desviar fluxos da China em antecipação ao fechamento. Incluir 2017 no cálculo faria o *share* capturar parte dessa reação antecipada, misturando a dependência estrutural prévia com a própria resposta à política.

o plástico e 0 para o alumínio. O coeficiente δ da interação tripla é o parâmetro de interesse e mede se o diferencial de exportação entre plástico e alumínio caiu mais nos países muito dependentes da China do que nos menos dependentes após o choque. É, portanto, a diferença de três diferenças: entre materiais, entre grupos de exposição e entre períodos. A estrutura de EFs absorve todas as fontes de variação que poderiam confundir o coeficiente, e convém explicitar o que cada termo remove. O EF γ_{ik} de exportador-produto, captura diferenças permanentes de escala exportadora de cada país em cada material; λ_{kt}, EF de produto-ano, absorve os choques comuns a todos os exportadores de um material em cada ano, como uma variação no preço mundial do plástico; e ψ_{it}, EF de exportador-ano, remove tudo o que afeta um país em um ano atingindo os dois materiais de forma idêntica, como uma recessão ou uma desvalorização cambial na origem. Com esses três conjuntos de efeitos fixos, todos os termos mais simples que compõem a interação tripla são absorvidos, incluindo as três variáveis isoladas, $Share_{i,k}$, $Post_t$ e $Product_{plastic}$, e as três interações entre pares delas. O que resta é identificado unicamente o coeficiente δ. Essa é a vantagem do desenho de tripla diferença sobre uma diferença em diferenças simples: ao comparar a resposta relativa de dois materiais, dispensa a hipótese de que o plástico sozinho seguiria uma tendência paralela e exige apenas que a diferença entre plástico e alumínio o faria.

Ao perder o mercado chinês, os países mais dependentes da China podem ter redirecionado seu plástico para os mesmos destinos usados pelos países menos dependentes. Nesse caso, os países menos dependentes, que servem de comparação no modelo, também acabariam afetados pelo choque, ainda que de forma indireta. Isso aproximaria os dois grupos e reduziria a diferença estimada entre os dois materiais. O efeito proveniente da possibilidade de transbordamento entre exportadores seria subestimar o impacto da política, e não exagerá-lo. Por essa razão, o coeficiente obtido deve ser entendido, assim, como um piso para a magnitude real do impacto.

A validade da comparação depende da hipótese de tendências paralelas, que aqui significa que na ausência da política, a diferença entre plástico e alumínio teria seguido a mesma trajetória nos países mais e menos dependentes da China. Essa hipótese é testada por um estudo de eventos, a partir da equação (5), que substitui o indicador de período posterior por um conjunto de indicadores de biênio:

$$\ln Y_{ikt} = \alpha + \sum_{s \neq 0} \theta_s \left(Share_i \times D_s \times Plastic_k\right) + \gamma_{ik} + \lambda_{kt} + \psi_{it} + \varepsilon_{ikt} \qquad (5)$$

em que D_s indexa os biênios 2010-2011, 2012-2013, 2014-2015, 2018-2019, 2020-2021 e 2022-2023, com o biênio 2016-2017 tomado como referência omitida. Cada coeficiente θ_s mede a diferença tripla naquele biênio frente à referência. A escolha do biênio imediatamente anterior à vigência como referência isola o efeito da implementação do efeito de eventual antecipação dos agentes ao anúncio de meados de 2017. Sob tendências paralelas, os coeficientes dos biênios anteriores devem ser estatisticamente nulos, sinal de que os grupos não divergiam antes da política, e os posteriores captam a dinâmica do ajustamento. A hipótese conjunta de nulidade dos coeficientes anteriores é testada por estatística de Wald.[6]

3.2.1 Testes placebo e falsificação

A robustez do coeficiente de tripla diferença é avaliada por um conjunto de exercícios: excluem-se o ano de 2017, para descartar contaminação por antecipação, e restringe-se o período posterior a 2018-2020, para checar se o efeito não é dirigido pelos anos finais. Removem-se Hong Kong e Macau, pelo papel de entrepostos de reexportação. Reestima-se por PPML, para acomodar zeros na variável de resultado. Aplicam-se placebos temporais que deslocam artificialmente o ano de tratamento para 2014 e 2016, anos sem política, sob os quais o coeficiente deve ser nulo. E aplica-se o placebo de produto com minério de ferro e cobre, conforme já mencionado.

3.3 Composição dos destinos alternativos e análise descritiva

O quarto objetivo verifica uma previsão do modelo gravitacional, pois, se o diferencial regulatório governa os fluxos de plástico e a capacidade governa os de alumínio, e se o *National Sword* deslocou o plástico para longe da China, então os destinos que absorveram esses fluxos devem ser de regulação mais

[6] A escolha do biênio 2016-2017 como referência isola o efeito da implementação, em janeiro de 2018, de eventual antecipação dos agentes ao anúncio de julho de 2017.

frouxa, não necessariamente de maior capacidade. Para cada exportador, calcula-se a média das características regulatórias e de capacidade dos destinos atendidos, ponderada pela participação de cada importador no valor exportado, e comparam-se as médias do período anterior e posterior ao choque por teste t pareado. Essa estratégia verifica se o perfil dos destinos é coerente com o mecanismo estimado nos dois modelos anteriores, e não constitui identificação causal autônoma.

Por fim, a tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis para os dois materiais. Nota-se um contraste de escala: o valor médio exportado de alumínio, de 14,7 bilhões de dólares por fluxo, supera em mais de cinco vezes o de plástico, de 2,7 bilhões, coerente com o alumínio ser commodity de maior valor unitário. O diferencial regulatório tem média próxima de zero e dispersão semelhante nos dois materiais, sugerindo que a assimetria regulatória dos pares não difere por material e permite comparação limpa. A capacidade de processamento, no logaritmo do indicador de material doméstico, é maior nos destinos de plástico, e a tarifa média do plástico, de 3,4%, supera a do alumínio, de 0,1%, o que reflete o tratamento tarifário mais protetivo conferido a resíduos de baixo valor.

Tabela 1. Estatísticas descritivas das variáveis por material, fluxos com comércio positivo

Variável	Material	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	N
Valor exportado (mil USD)	Plástico	2.747.514	16.831.965	0	521.783.143	25.145
	Alumínio	14.690.679	58.903.496	0	1.471.928.791	11.936
Diferencial regulatório	Plástico	0,07	1,01	-3,34	2,83	25.145
	Alumínio	0,06	1,00	-4,43	2,70	11.936
Ln capacidade (DMI)	Plástico	16,96	0,88	15,02	18,43	23.243
	Alumínio	15,29	1,00	12,62	17,57	11.189
Tarifa aplicada (%)	Plástico	3,38	7,23	0,00	45,00	25.145
	Alumínio	0,12	0,60	0,00	5,00	11.936

Elaboração própria. Nota: valores de comércio em dólares correntes. O diferencial regulatório é a qualidade regulatória do exportador menos a do importador (WGI). A capacidade é o logaritmo do indicador de material doméstico (PNUD/IRP).

4. Resultados

A tabela 2 reúne as estimativas do modelo gravitacional para os dois materiais nas duas especificações (A e B). Antes de interpretar os coeficientes, convém retomar o que o referencial estabeleceu. Em um modelo com interação de duas variáveis contínuas, o coeficiente da interação mede a inclinação da relação, não o efeito da regulação em si, cuja interpretação exige os efeitos marginais da tabela 3. Essa distinção é o que organiza toda a interpretação a seguir.

Tabela 2. Modelo gravitacional PPML, resíduos de plástico e alumínio

Variável	Plástico (A)	Plástico (B)	Alumínio (A)	Alumínio (B)
Diferencial regulatório	0,2863 (0,3591)	-	0,5228 (0,3561)	-
Ln capacidade (DMI)	1,4771*** (0,2720)	-	0,1258 (0,1974)	-
Diferencial × capacidade	-0,9187*** (0,2001)	0,4403*** (0,1645)	0,2874* (0,1541)	0,1621 (0,1398)
Ln (1 + tarifa)	-0,2274* (0,1190)	-0,0515 (0,0516)	0,1615 (0,1383)	0,0376 (0,1675)
Acordo ambiental	1,0158*** (0,2044)	0,0282 (0,1259)	0,5748* (0,3386)	0,2041 (0,1899)
Efeitos fixos exp-prod-ano	Sim	Sim	Sim	Sim
Efeitos fixos imp-prod	Sim	-	Sim	-
Efeitos fixos imp-prod-ano	-	Sim	-	Sim
Efeitos fixos par	Sim	Sim	Sim	Sim
Observações	61.488	57.895	17.077	17.077
Pseudo R^2	0,85	0,96	0,91	0,94

Elaboração própria. Nota: variável dependente é o valor exportado em nível, estimado por PPML. A especificação (A) usa efeitos fixos de importador-produto; a (B), de importador-produto-ano, que absorve a capacidade do importador. A capacidade entra centralizada na interação. Erros padrão agrupados por par bilateral entre parênteses. *** p<0,01; ** p<0,05; * p<0,10.

A tabela 3 apresenta o efeito marginal do diferencial regulatório em três níveis de capacidade do destino. Para o plástico, em destinos de baixa capacidade, no percentil 25, o efeito é positivo e estatisticamente significativo (1,0177): o plástico flui para onde a regulação é frouxa. No nível mediano o efeito cai para 0,2302 e deixa de significativo, e no percentil 75 torna-se negativo (-0,3207), também sem

significância. O padrão é o previsto pelo referencial: a permissividade regulatória atrai o plástico apenas quando o destino combina regulação frouxa com baixa capacidade, ou seja, quando não tem alternativa econômica de processar o material, e deixa de atrair quando o destino é capaz de absorvê-lo por razão industrial. Esse resultado é coerente com a caracterização dual do resíduo, que funciona como poluição a ser descartada para o país de origem e como recurso apenas para o destino dotado de capacidade de reciclagem (Kellenberg, 2012; Li et al., 2021), e com a existência de um limiar de capacidade produtiva abaixo do qual a reciclagem não é economicamente viável (Duan et al., 2021). Confirmam-se a primeira e a terceira hipóteses.

Tabela 3. Efeito marginal do diferencial regulatório por nível de capacidade do destino

Nível de capacidade do destino	Plástico	Alumínio
Baixa (percentil 25)	1,0177***	0,3941
	(0,3721)	(0,3884)
Mediana	0,2302	0,5646
	(0,3610)	(0,3479)
Alta (percentil 75)	-0,3207	0,7091**
	(0,3995)	(0,3298)

Elaboração própria. Nota: efeitos marginais calculados a partir da especificação (A) da Tabela 2, com erros padrão pelo método delta entre parênteses. *** p<0,01; ** p<0,05.

As magnitudes têm interpretação econômica direta, porque o PPML estima o fluxo em nível, e um efeito marginal se traduz em variação percentual do fluxo. Em destinos de baixa capacidade, o coeficiente de 1,0177 do diferencial regulatório significa que um aumento de um desvio padrão nesse diferencial (cerca de uma unidade), está associado a um fluxo de plástico aproximadamente 177%[7] maior para esse destino. Mesmo variações menores produzem efeitos expressivos: meio desvio padrão eleva o fluxo em cerca de 66%, e um décimo, em torno de 11%. Para dimensionar, uma unidade nesse indicador equivale à diferença de rigor regulatório entre um país de governança média e outro entre os mais permissivos da amostra, de modo que a permissividade do destino, somada à baixa capacidade, é uma das forças centrais por trás do redirecionamento do plástico. A capacidade de processamento atua na mesma direção: com elasticidade de 1,4771, um destino com 10% mais capacidade instalada atrai cerca de 15% mais plástico, o que confirma que a existência de parque industrial eleva a atratividade do destino.

Para o alumínio, a interação entre diferencial regulatório e capacidade é positiva e significativa na especificação principal (0,2874, tabela 2). Os efeitos marginais do diferencial regulatório sobre o alumínio (tabela 3), são nulos em destinos de baixa e média capacidade (0,3941 e 0,5646, sem significância) e tornam-se positivos e significantes apenas em destinos de alta capacidade (0,7091). Nota-se que o padrão observado para o alumínio é o oposto do plástico, em que a regulação importa onde a capacidade de processamento é baixa, ao passo que no alumínio a regulação tem feitos nos destinos que já dispõem de parque industrial, sinal coerente com o de material processado por razão de eficiência econômica e não redirecionado por permissividade. O contraste entre os dois materiais sustenta o argumento principal do estudo: o plástico é atraído pela regulação frouxa onde não há capacidade de tratá-lo, ao passo que o alumínio segue a capacidade de processamento do destino.

A interação entre diferencial regulatório e capacidade, no plástico, é significativa nas duas especificações, entretanto, os sinais são opostos: negativa na especificação A (-0,9187) e positiva na B (0,4403). Essa inversão tem explicação ligada ao que cada especificação consegue medir. O plástico tem um único produto, de modo que os efeitos fixos de importador-produto-ano da especificação B equivalem a efeitos fixos de importador-ano. Como a capacidade de processamento do importador é uma característica da dimensão do importador e varia ano a ano, esse efeito fixo absorve quase toda a variação da capacidade. A interação, que na especificação A mede como o efeito da regulação muda conforme o nível de capacidade do destino, passa na especificação B a medir apenas a variação residual da capacidade, aquilo que sobra depois de retirada a média de cada importador em cada ano. São quantidades diferentes, e por isso os resultados não precisam coincidir.

[7] Os efeitos percentuais são obtidos por $\left(e^{\beta}-1\right)\times 100$ para variáveis em nível e por $\left[(1+p)^{\beta}-1\right]\times 100$ para a capacidade, em log.

Para confirmar que a inversão vem dessa mudança de efeitos fixos, e não de instabilidade do resultado, reestimou-se a especificação A substituindo apenas o efeito fixo de importador pelo de importador-ano: a interação passa de -0,9187 para um valor positivo, reproduzindo o sinal da especificação B. Isso demonstra que a diferença de sinal é gerada pela estrutura de efeitos fixos, e não por fragilidade da estimativa. Com isso, deve ficar claro que a especificação A é a que testa a hipótese, por preservar a variação da capacidade de que a interação depende, ao passo que a especificação B não identifica essa interação de forma interpretável no caso do plástico, servindo para verificar a robustez dos demais coeficientes sob controle mais exigente do destino. A capacidade de processamento isolada aparece positiva e significativa na especificação A do plástico (1,4771), e sugere que os destinos com maior capacidade instalada importam mais resíduo plástico mesmo antes de considerar o diferencial regulatório.

A variável de acordos com provisões ambientais é positiva e significativa para o plástico nas duas especificações, sinal de que a cooperação formalizada eleva o comércio bilateral desse resíduo, e não significativa para o alumínio. O efeito aparecer no plástico e não no alumínio é coerente com a interpretação dos dois mercados: no plástico, de baixo valor e alta incerteza quanto à qualidade do material, o acordo funciona como infraestrutura institucional que viabiliza o fluxo, pela harmonização de normas de classificação e pela previsibilidade quanto ao tratamento no destino; no alumínio, insumo de valor estabelecido cujos fluxos já se dirigem a destinos com escala metalúrgica, o conteúdo ambiental do acordo pouco altera o padrão. A tarifa apresenta o sinal esperado e reduz o fluxo de plástico. Em conjunto, os resultados do modelo gravitacional sustentam as três primeiras hipóteses.

A tabela 4 apresenta o coeficiente de tripla diferença e os coeficientes do estudo de eventos. O coeficiente é de -1,706 e significativo, o que corresponde ao contraste teórico entre um exportador com exposição nula e outro com exposição plena ao mercado chinês, uma diferença de cerca de 82% no valor exportado de plástico relativamente ao alumínio, e não a uma redução de todas as exportações de plástico dos países mais dependentes. Em termos de uma variação observável, um aumento de 10 pontos percentuais na dependência prévia do mercado chinês associa-se a uma redução aproximada de 15,7% no valor exportado de plástico relativamente ao alumínio após a política. A magnitude acompanha o fechamento quase completo do principal destino desses fluxos.

Tabela 4. Tripla diferença e estudo de eventos, exportações de plástico

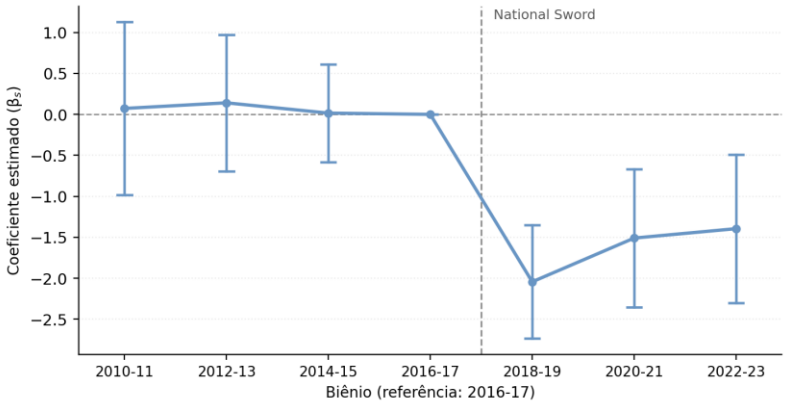
Biênio / Estimativa	Coeficiente
2010-11	0,073 (0,539)
2012-13	0,141 (0,424)
2014-15	0,016 (0,304)
2016-17 (referência)	-
2018-19	-2,043*** (0,354)
2020-21	-1,509*** (0,430)
2022-23	-1,395*** (0,461)
Efeito médio (Post × Share × Plástico)	-1,706*** (0,391)
Teste de Wald pré-tendências (p-valor)	0,987

Elaboração própria. Nota: variável dependente é o logaritmo do valor exportado. Todas as especificações incluem efeitos fixos de exportador-produto, produto-ano e exportador-ano. Erros padrão agrupados por exportador entre parênteses. *** p<0,01.

O estudo de eventos, na figura 1, mostra que os três biênios anteriores ao choque situam-se próximos de zero e sem significância estatística, o que sustenta a hipótese de tendências paralelas. Os três biênios posteriores tornam-se negativos e significativos, com quedas persistentes que não se revertem. A ausência de efeito antes de 2018 é o resultado esperado: sugere que os grupos de maior e menor dependência não se afastavam antes de a política existir, condição sem a qual a comparação não seria válida. O teste de Wald conjunto sobre os coeficientes anteriores não rejeita a hipótese de trajetórias paralelas, com p-valor de 0,987, e os intervalos de confiança do período anterior, ainda que amplos, excluem efeitos da ordem dos observados após o choque, de modo que a não rejeição não decorre apenas de imprecisão das estimativas.

A dinâmica dos coeficientes posteriores também é informativa quanto à natureza do ajustamento. O efeito é maior no primeiro biênio após o choque, com coeficiente de -2,043, e atenua-se nos biênios seguintes, para -1,509 e -1,395, sem em nenhum momento retornar a zero. Essa trajetória é coerente com um ajustamento parcial: o impacto imediato do fechamento do mercado chinês é o mais forte, e a atenuação subsequente reflete a busca gradual dos exportadores por destinos alternativos, que recompõe parte do fluxo sem, contudo, restaurar o patamar anterior. A persistência do efeito ao longo de três biênios afasta a interpretação de que a queda seria um ajuste transitório de estoques e reforça que o choque produziu uma reconfiguração duradoura da geografia do comércio de plástico.

Figura 1. Estudo de eventos: efeito do *National Sword* sobre as exportações de plástico por biênio



Elaboração própria. Nota: cada ponto é o coeficiente da tripla interação no biênio, com intervalo de confiança de 95%. O biênio 2016-17 é a referência omitida. A linha tracejada vertical marca a vigência da política em 2018.

A tabela 5, que reúne as verificações de robustez do coeficiente de tripla diferença, mostra que o efeito mantém sinal, magnitude e significância ao excluir o ano de 2017, ao restringir o período posterior a 2018-2020, ao remover Hong Kong e Macau e ao reestimar por PPML, com coeficientes entre -1,58 e -2,76. Os placebos temporais para 2014 e 2016 produzem coeficientes não significativos, sinal de que o desenho não gera efeito espúrio em anos sem política, e o placebo de produto com minério de ferro e cobre também não apresenta efeito, com p-valor de 0,490, o que descarta que a queda seja um artefato do estimador ou que o *share* esteja captando exposição econômica geral à China. O conjunto de verificações sustenta a interpretação causal do efeito do *National Sword* sobre o plástico.

Tabela 5. Robustez do coeficiente de tripla diferença

Exercício de robustez	Coeficiente
Especificação base	-1,706***
	(0,391)
Exclusão de 2017	-1,747***
	(0,416)
Período posterior restrito a 2018-2020	-1,895***
	(0,411)
Exclusão de Hong Kong e Macau	-1,577***
	(0,391)
Estimação por PPML	-2,757***
	(0,404)
Placebo temporal 2014	0,112
	(0,289)
Placebo temporal 2016	-0,208
	(0,301)
Placebo de produto (ferro e cobre)	-0,365
	(0,527)

Elaboração própria. Nota: cada linha reestima a especificação de tripla diferença sob a alteração indicada. Erros padrão agrupados por exportador entre parênteses. *** p<0,01. Fonte: elaboração própria.

O mecanismo econômico por trás da retração das exportações de plástico merece explicação, pois conecta a magnitude estimada à decisão dos exportadores. O fechamento do mercado chinês eliminou, em curto intervalo, o destino que absorvia cerca de metade do plástico exportado por diversos países. Diante do choque, o exportador enfrenta três margens de ajuste: reduzir a produção de resíduo destinada à

exportação, redirecionar o fluxo para outros destinos, ou acumular o material internamente. A queda de cerca de 82% no volume exportado pelos países mais dependentes, combinada ao aumento da participação de destinos menos regulados documentado na análise de composição, sugere que a margem de redirecionamento operou de forma parcial: parte do plástico encontrou novos destinos, de governança mais frágil, mas o volume total não se recompôs no período analisado. Esse padrão é coerente com o resultado do modelo gravitacional, segundo o qual o plástico só é atraído por destinos que combinam regulação frouxa e baixa capacidade, uma combinação que limita quanto cada destino alternativo consegue absorver e explica por que a substituição do mercado chinês foi incompleta.

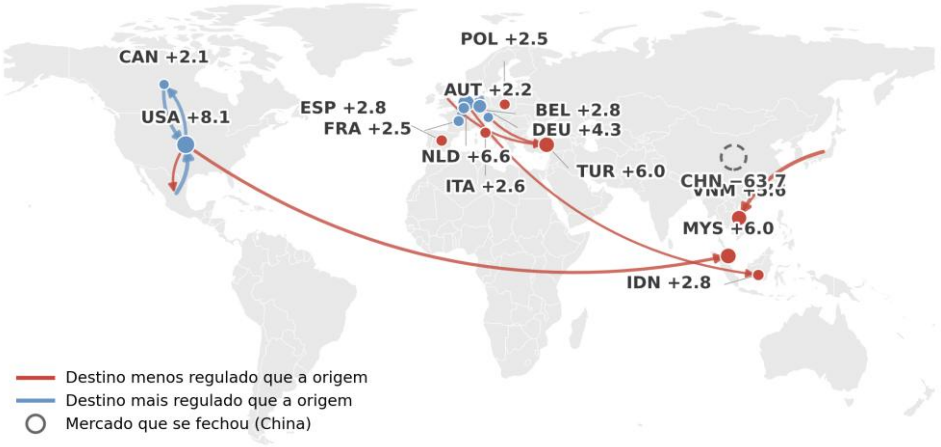
A tabela 6 e a figura 2 caracteriza os destinos que absorveram os fluxos redirecionados, e conecta o resultado causal da tripla diferença ao mecanismo do modelo gravitacional. Antes do choque, 30,9% do valor exportado de plástico para destinos que não a China dirigia-se a países menos regulados que a origem; no período posterior essa participação sobe para 58,0%, um aumento de 27,1 pontos percentuais, valor significativo ao nível de 1%. Para o alumínio a variação é de apenas 2,5 pontos percentuais, um deslocamento pequeno e sem significância isolada, compatível com a flutuação normal da composição de destinos. O contraste entre os dois materiais, dez vezes maior no plástico, sustenta o argumento: o alumínio não apresenta resposta própria e serve de referência estável contra a qual se mede o deslocamento do plástico.

Tabela 6. Composição dos destinos antes e depois do *National Sword*

Indicador	Material	Antes	Depois	Variação
% para destino menos regulado	Plástico	30,9	58,0	+27,1***
	Alumínio	68,4	70,9	+2,5
Número de destinos (70% do valor)	Plástico	2	12	+10
	Alumínio	6	9	+3

Elaboração própria. Nota: participação do valor exportado dirigida a destinos com qualidade regulatória inferior à da origem, e número de destinos que concentram 70% do valor exportado, por período. Teste t pareado. *** p<0,01.

Figura 2. Redirecionamento dos fluxos de resíduos plásticos após o *National Sword*



Elaboração própria. Nota: os círculos indicam o ganho de participação de cada destino, em pontos percentuais, entre os períodos anterior e posterior ao choque. As setas representam os doze maiores aumentos de fluxo bilateral, com espessura proporcional ao aumento. A cor distingue destinos menos regulados que a origem daqueles mais regulados. O agregado Ásia, outros, sem localização única, foi omitido do mapa.

O perfil dos destinos é coerente com a previsão do modelo gravitacional: o plástico passou a ser dirigido a destinos de governança mais frágil, movimento ausente no alumínio, enquanto a capacidade de processamento não distingue os dois materiais. Antes do choque, a China e Hong Kong estavam entre os principais destinos do plástico, ao lado de Japão, Estados Unidos e Alemanha, e depois de 2018 ambos deixam o topo da lista, substituídos por uma combinação de destinos europeus de maior capacidade e países do Sudeste Asiático de governança mais frágil, sobretudo Malásia, Vietnã, Tailândia e Indonésia. Esses países combinavam, à época, regulação ambiental menos rigorosa e capacidade de reciclagem limitada frente ao volume recebido, exatamente o perfil que o modelo gravitacional identifica como atrator do plástico, e sua rápida saturação explica, do lado da demanda, por que o volume total não se recompôs e por que o efeito da tripla diferença persiste nos biênios seguintes (Brooks et al., 2018; Wang et al., 2020; Shi

et al., 2021). O redirecionamento não se limitou a países de menor renda, tendo alcançado também destinos de governança forte e capacidade instalada elevada, o que é consistente com o duplo papel da capacidade na atração do material. O perfil de destinos do alumínio permaneceu estável, ancorado em Estados Unidos e Alemanha antes e depois do choque, de modo que a recomposição atinge o material sob restrição e poupa o material contrafactual, como prevê o mecanismo. Confirma-se a quarta hipótese. A composição detalhada dos destinos por país exportador está no Anexo C.

Os três resultados compõem um quadro coerente, e cada um se apoia no mecanismo teórico exposto no referencial. O modelo gravitacional mostra que o plástico segue o paraíso da poluição em sua forma condicional, com a permissividade atraindo o material apenas onde falta capacidade de processá-lo, e que o alumínio segue a especialização eficiente, governado pela capacidade e insensível à regulação. A tripla diferença demonstra que o *National Sword*, ao interromper o acesso ao principal destino do plástico, reduziu em cerca de 82% as exportações dos países mais dependentes, sem efeito comparável no alumínio. A composição dos destinos mostra que o plástico deslocado migrou para jurisdições menos reguladas, exatamente o tipo de destino que o modelo gravitacional identifica como atrator do material. O contrafactual do alumínio articula os três resultados: sem ele, a queda de 82% poderia ser atribuída a uma desaceleração geral do comércio, e é a estabilidade do alumínio no mesmo período e entre os mesmos exportadores que permite atribuí-la à política.

Ao fornecer à literatura o contrafactual ausente, este estudo supera uma limitação dos trabalhos anteriores: Brooks et al. (2018) documentam a reconfiguração do comércio de plástico após o choque, mas, sem um material de comparação, não conseguem separar o efeito da política das tendências gerais, ao passo que Kellenberg (2012) e Pothen e Hundt (2024) estimam determinantes do comércio de resíduos com um coeficiente comum que mistura materiais de lógicas opostas. Ao comparar dois materiais exportados pelos mesmos países sob o mesmo choque, foi possível isolar o efeito da regulação das características econômicas do material e mostrar que um mesmo instrumento regulatório produz efeitos opostos conforme a estrutura de mercado. Os coeficientes dialogam com esses trabalhos em magnitude: a semielasticidade que Kellenberg (2012) encontra para o diferencial de custo ambiental é da ordem da aqui estimada para o plástico em baixa capacidade, o que sugere que seu coeficiente comum seja uma média entre o efeito do plástico e o efeito nulo do alumínio, e a retração de 82% da tripla diferença acompanha a queda de importações chinesas documentada por Brooks et al. (2018), com a diferença de que aqui ela é atribuída à política, e não a uma tendência geral, atribuição que só o contrafactual do alumínio permite. O padrão não monotônico dos efeitos marginais, por fim, acompanha a versão condicional de Hu et al. (2020), em que o rigor do importador só eleva a absorção acima de um limiar de capacidade.

Um desdobramento com consequência direta para a política internacional é a possibilidade de uma cascata regulatória, pois, diante do afluxo de resíduo plástico, vários países receptores adotaram a partir de 2019 suas próprias restrições à importação, replicando em menor escala a medida chinesa. Esse encadeamento sugere que a resposta de um grande importador não elimina o descarte transfronteiriço, apenas o transfere, e que a ausência de disciplina multilateral tende a produzir uma sucessão de restrições unilaterais, com o resíduo deslocando-se de um destino permissivo ao seguinte, sem que o volume global mal processado diminua. O controle eficaz depende, portanto, menos de barreiras nacionais isoladas e mais de um critério comum ancorado na capacidade verificada de processamento do destino.

Esse critério ganharia precisão ao condicionar o regime de cada fluxo à estrutura de mercado do material, e não à divisão binária entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. Resíduos com mercados secundários consolidados, como o alumínio, podem ser disciplinados pela verificação da capacidade instalada no destino, já que o fluxo se dirige naturalmente a quem tem parque para absorvê-lo, ao passo que resíduos de baixo valor e processamento difuso, como o plástico, exigem controle do diferencial regulatório entre origem e destino, para evitar que o comércio funcione como descarte encoberto. Em vez de listar países proibidos de importar, abordagem que a experiência chinesa mostrou ser contornável pela migração ao vizinho, a regra condicionaria a autorização à demonstração, pelo importador, de capacidade de tratamento compatível com o volume, aferida por indicadores verificáveis. Instrumentos como as emendas da Convenção de Basileia e o regulamento europeu de transferência de resíduos avançam nessa direção, mas nenhum diferencia as disciplinas pela estrutura de mercado. Uma regra assim protegeria as populações dos países receptores de menor renda sem expô-las a retaliação, daria regras uniformes aos exportadores

que cumprem a regulação e ofereceria aos organismos multilaterais um critério tecnicamente defensável, ancorado em capacidade e não em renda, menos sujeito a contestação como barreira protecionista. No limite, ao ampliar a capacidade de reciclagem no destino, a política altera o próprio sinal do fluxo, convertendo um destino que atraía o plástico por ser permissivo em um que o atrai por ser produtivo, o que faz do investimento em capacidade e da disciplina do diferencial regulatório instrumentos complementares, cuja combinação desloca o comércio de resíduo do padrão de descarte para o de suprimento industrial que a economia circular pressupõe.

5. Considerações finais

Este estudo investigou se a assimetria regulatória ambiental e a capacidade de processamento do destino determinam de forma distinta os fluxos de resíduos plásticos e de sucata de alumínio, e identificou o efeito causal da *National Sword* sobre esse comércio. O modelo gravitacional mostra que os dois materiais obedecem a lógicas opostas: no plástico, o diferencial regulatório eleva o fluxo apenas quando a capacidade do destino é baixa, e no alumínio a regulação não exerce efeito robusto, com o fluxo governado pela capacidade instalada. A tripla diferença, ao explorar a *National Sword* como choque exógeno e usar o alumínio como contrafactual, mostra que a política reduziu em cerca de 82% as exportações de plástico dos países mais dependentes da China, com resposta fraca do alumínio, e a composição dos destinos confirma que o plástico deslocado migrou para jurisdições de menor rigor regulatório.

A principal contribuição é demonstrar essa distinção com identificação causal, dentro de um desenho que compara dois materiais exportados pelos mesmos países e no mesmo período, diferindo apenas na exposição à política, o que permite atribuir as diferenças de resposta às características dos materiais e não à conjuntura. Os resultados devem ser lidos à luz de algumas limitações. A qualidade regulatória é um indicador de governança geral, não de regulação ambiental específica de resíduos, o que pode atenuar a precisão da medida de assimetria. O alumínio, embora fora da política de 2018, passou a ser parcialmente alcançado pelo banimento chinês de resíduos sólidos de 2021, o que pode comprimir o diferencial entre os materiais nos biênios finais e reduzir os coeficientes posteriores do estudo de eventos. A análise de composição verifica uma previsão do modelo e não identifica um efeito causal próprio. E a base bilateral não inclui comércio intrafirma nem fluxos ilegais, que podem representar parte dos movimentos de resíduos de menor valor.

Os resultados obtidos abrem novas possibilidades de investigação. Entre elas, destaca-se a extensão da análise para outros pares de materiais, como resíduos têxteis e eletrônicos, que combinam baixo valor e composição heterogênea e, portanto, podem apresentar comportamento mais próximo ao observado para o plástico. Também é relevante avaliar a persistência da reconfiguração dos destinos do plástico e investigar se países receptores, como Malásia e Vietnã, que adotaram restrições próprias a partir de 2019, reproduzem a cascata regulatória iniciada pela China. Além disso, a incorporação de dados de preços de referência pode contribuir para distinguir os efeitos associados aos preços daqueles relacionados à regulação na determinação dos fluxos. No plano político, os resultados indicam que a eficácia das regras internacionais de resíduos depende da capacidade de diferenciar o tratamento regulatório conforme a estrutura de mercado de cada material, em vez de aplicar um modelo único a todos os fluxos.

Referências

Aiken, L. S., & West, S. G. (1991). Multiple regression: Testing and interpreting interactions. Sage.

Anderson, J. E., & van Wincoop, E. (2003). Gravity with gravitas: A solution to the border puzzle. American Economic Review, 93(1), 170–192. https://doi.org/10.1257/000282803321455214

Baggs, J. (2009). International trade in hazardous waste. Review of International Economics, 17(1), 1–16. https://doi.org/10.1111/j.1467-9396.2008.00797.x

Basel Convention. (1995). Decision III/1: Amendment to the Convention (Ban Amendment). Secretariat of the Basel Convention.

Basel Convention. (2019). Plastic waste amendments (decisions BC-14/12 and related). Secretariat of the Basel Convention.

Brooks, A. L., Wang, S., & Jambeck, J. R. (2018). The Chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. Science Advances, 4(6), eaat0131. https://doi.org/10.1126/sciadv.aat0131

Capuzzi, S., & Timelli, G. (2018). Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: A review. Metals, 8(4), 249. https://doi.org/10.3390/met8040249

China. (2020). Law of the People's Republic of China on the prevention and control of environmental pollution by solid wastes (revised). Standing Committee of the National People's Congress.

Cole, M. A. (2004). Trade, the pollution haven hypothesis and the environmental Kuznets curve: Examining the linkages. Ecological Economics, 48(1), 71–81. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.09.007

Copeland, B. R., & Taylor, M. S. (1994). North-South trade and the environment. Quarterly Journal of Economics, 109(3), 755–787. https://doi.org/10.2307/2118421

Cottom, J. W., Cook, E., & Velis, C. A. (2024). A local-to-global emissions inventory of macroplastic pollution. Nature, 633(8028), 101–108. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07758-6

D'Amato, A., Mazzanti, M., & Nicolli, F. (2015). Waste and organized crime in regional environments. Resource and Energy Economics, 41, 185–201. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2015.04.003

Duan, H., Zhao, Q., Song, J., & Duan, Z. (2021). Identifying opportunities for initiating waste recycling: Experiences of typical developed countries. Journal of Cleaner Production, 328, 129503. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129503

Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., Sibley, S. F., & Sonnemann, G. (2011). What do we know about metal recycling rates? Journal of Industrial Ecology, 15(3), 355–366. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x

Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. Journal of Hazardous Materials, 344, 179–199. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014

Hu, H., Li, X., Nguyen, A. D., & Kavan, P. (2020). A critical evaluation of waste incineration plants in Wuhan (China) based on site selection, environmental influence, public health and public participation. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(19), 7071. https://doi.org/10.3390/ijerph17197071

Jiang, X., & Bateer, B. (2025). A systematic review of plastic recycling: Technology, environmental impact and economic evaluation. Waste Management & Research, 43(1). https://doi.org/10.1177/0734242X241310658

Kellenberg, D. (2012). Trading wastes. Journal of Environmental Economics and Management, 64(1), 68–87. https://doi.org/10.1016/j.jeem.2012.02.003

Kellenberg, D., & Levinson, A. (2014). Waste of effort? International environmental agreements. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, 1(1/2), 135–169. https://doi.org/10.1086/676037

Larch, M., Shikher, S., & Yotov, Y. V. (2025). Estimating the effects of trade agreements: Lessons from 60 years of methods and data. The World Economy.

Li, B., Alleyne, A., Zhang, Z., & Mu, Y. (2021). Sustainability and waste imports in China: Pollution haven or resources hunting. Sustainability, 13(2), 932. https://doi.org/10.3390/su13020932

Liu, Z., Liu, W., Walker, T. R., Adams, M., & Zhao, J. (2022). How does the global plastic waste trade contribute to environmental benefits? Journal of Environmental Management, 316, 115330. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115330

Morin, J.-F., Dür, A., & Lechner, L. (2018). Mapping the trade and environment nexus: Insights from a new data set. Global Environmental Politics, 18(1), 122–139. https://doi.org/10.1162/glep_a_00447

OECD. (2022). Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/de747aef-en

Olden, A., & Møen, J. (2022). The triple difference estimator. The Econometrics Journal, 25(3), 531–553. https://doi.org/10.1093/ectj/utac010

Pathak, G., Nichter, M., Hardon, A., & Moyer, E. (2024). The open burning of plastic wastes is an urgent global health issue. Annals of Global Health, 90(1), 3. https://doi.org/10.5334/aogh.4232

Porter, M. E., & van der Linde, C. (1995). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. Journal of Economic Perspectives, 9(4), 97–118. https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97

Pothen, F., & Hundt, C. (2024). The trade of waste and the pollution haven hypothesis: Evidence from a gravity model. Resource and Energy Economics, 76, 101423. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2024.101423

Santos Silva, J. M. C., & Tenreyro, S. (2006). The log of gravity. Review of Economics and Statistics, 88(4), 641–658. https://doi.org/10.1162/rest.88.4.641

Shi, J., Zhang, C., & Chen, W.-Q. (2021). The expansion and shrinkage of the international trade network of plastic wastes affected by China's waste management policies. Environmental Science & Technology Letters, 8(9), 763–769. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00527

União Europeia. (2024). Regulamento (UE) 2024/1157 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 11 de abril de 2024, relativo a transferências de resíduos. Jornal Oficial da União Europeia, L, 30 abr. 2024.

Wang, C., Zhao, L., Lim, M. K., Chen, W.-Q., & Sutherland, J. W. (2020). Structure of the global plastic waste trade network and the impact of China's import ban. Resources, Conservation and Recycling, 153, 104591. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104591

World Trade Organization. (2017). Notification G/TBT/N/CHN/1211: China, import of solid wastes. WTO.

Anexo A. Seleção da amostra de países

Tabela A.1. Exportadores e importadores selecionados

Plástico		Alumínio	
Exportadores (48)	**Importadores (29)**	**Exportadores (55)**	**Importadores (29)**
Japão; Estados Unidos; Alemanha; Hong Kong; França; Tailândia; Bélgica; Reino Unido; Holanda; México; Canadá; Malásia; Filipinas; Espanha; Coreia do Sul; Taiwan; Austrália; Itália; Indonésia; Polônia; Vietnã; Macau;	China; Hong Kong; Estados Unidos; Holanda; Alemanha; Taiwan; Malásia; Bélgica; Itália; Canadá; Vietnã; Turquia; Áustria; Índia; Irlanda; França; Indonésia; Espanha; Reino Unido;	Estados Unidos; Alemanha; Canadá; Reino Unido; Holanda; Austrália; França; Hong Kong; Malásia; Bélgica; México; Emirados Árabes; Espanha; Arábia Saudita; Polônia; Japão; Áustria; Tailândia; Suíça; Itália; Hungria; Suécia; Taiwan; Dinamarca;	China; Índia; Coreia do Sul; Alemanha; Estados Unidos; Itália; França; Áustria; Malásia; Bélgica; Polônia; Luxemburgo; Tailândia;

China; Eslovênia; Áustria; Tchéquia; Suécia; Portugal; Arábia Saudita; Suíça; Irlanda; Bangladesh; Dinamarca; Singapura; Emirados Árabes; Iêmen; Eslováquia; Hungria; Romênia; Paquistão; Nova Zelândia; Grécia; Tunísia; Equador; Honduras; Índia; Turquia; Noruega.	Polônia; Coreia do Sul; Tailândia; Portugal; México; Bahamas; Eslovênia; Tchéquia; Romênia; Dinamarca.	Eslováquia; Israel; Singapura; Tchéquia; África do Sul; Filipinas; Portugal; Camboja; Nova Zelândia; Colômbia; Eslovênia; Bulgária; Vietnã; Finlândia; Guatemala; Marrocos; China; Kuwait; Chile; Noruega; Croácia; Romênia; Coreia do Sul; Líbia; Grécia; Irlanda; Líbano; Turquia; Jordânia; Nigéria; Lituânia.	Holanda; Hong Kong; Espanha; México; Canadá; Romênia; Taiwan; Tchéquia; Reino Unido; Brasil; Indonésia; Eslovênia; Turquia; Japão; Hungria; Grécia.

Elaboração própria.

Anexo B. Estimação em duas etapas do efeito da capacidade

Tabela B.1. Segunda etapa: efeito da capacidade sobre a atratividade do destino

Variável dependente: efeito fixo importador-produto-ano	Plástico	Alumínio
Ln capacidade de processamento (DMI)	0,6421***	0,7108***
	(0,142)	(0,131)
Efeito fixo de ano	Sim	Sim
Observações (importador-ano)	364	287
R^2	0,58	0,63

Elaboração própria. Nota: regressão por mínimos quadrados da estimativa do efeito fixo de importador-produto-ano sobre o logaritmo da capacidade, ao nível de importador-ano. Erros padrão agrupados no importador entre parênteses. *** p<0,01.

Anexo C. Composição dos destinos por país exportador

Tabela C.1. Plástico: participação para destinos menos regulados, por exportador (%)

Exportador	Antes	Depois	Variação	Exportador	Antes	Depois	Variação
Macau	0.0	66.2	+66.2	Polônia	11.1	24.0	+12.9
Noruega	16.8	75.4	+58.6	Romênia	15.4	27.4	+12.0
Coreia do Sul	26.9	85.2	+58.4	Áustria	45.6	55.5	+9.9
Grécia	10.3	67.7	+57.4	Índia	1.0	6.7	+5.8
Nova Zelândia	36.6	87.6	+51.0	Portugal	15.4	18.1	+2.7
Japão	7.1	56.0	+48.9	Turquia	0.5	1.8	+1.3
Eslovênia	9.5	56.5	+47.0	Hong Kong, China	97.2	98.0	+0.8
Austrália	41.7	88.6	+46.9	Bangladesh	0.0	0.0	+0.0
Canadá	55.2	96.1	+41.0	Iêmen	0.0	0.0	+0.0
Irlanda	17.9	50.1	+32.2	Taiwan	0.0	0.0	+0.0
Tchéquia	20.7	50.3	+29.7	Equador	0.0	0.0	+0.0
Malásia	8.3	37.0	+28.7	Vietnã	0.0	0.0	+0.0
Estados Unidos	30.1	58.8	+28.7	Paquistão	0.0	0.0	-0.0
Espanha	33.9	58.4	+24.5	Itália	13.2	12.8	-0.4
Reino Unido	40.4	64.7	+24.3	Tunísia	0.6	0.2	-0.5
Holanda	77.7	97.9	+20.2	Honduras	1.7	0.0	-1.7
Alemanha	43.5	63.5	+20.0	Indonésia	8.1	5.9	-2.2
Dinamarca	65.7	84.2	+18.5	Emirados Árabes	43.5	38.7	-4.8
Bélgica	30.4	48.1	+17.7	Arábia Saudita	13.2	7.1	-6.1
Singapura	81.3	97.7	+16.5	Suécia	78.6	71.7	-6.9
França	30.2	45.5	+15.4	México	9.4	0.8	-8.7
China	2.0	17.2	+15.1	Hungria	24.7	15.3	-9.4
Eslováquia	16.5	31.5	+15.0	Tailândia	22.6	11.9	-10.7
Filipinas	1.9	15.9	+14.0	Suíça	91.7	80.6	-11.1

Elaboração própria. Nota: participação do valor exportado de plástico dirigida a destinos com qualidade regulatória inferior à do exportador (WGI), excluída a China. Ordenado por variação. Fonte: elaboração própria com dados do WITS e do WGI.

Tabela C.2. Alumínio: participação para destinos menos regulados, por exportador (%)

Exportador	Antes	Depois	Variação	Exportador	Antes	Depois	Variação
Irlanda	16.1	70.0	+53.9	Singapura	98.1	99.8	+1.6
Eslovênia	4.4	36.2	+31.8	Hong Kong, China	98.5	99.0	+0.6
Jordânia	34.0	63.5	+29.4	Canadá	98.8	99.3	+0.4
Romênia	6.6	32.8	+26.1	Suécia	93.0	93.4	+0.4
Portugal	20.3	37.9	+17.7	Dinamarca	78.9	79.3	+0.3
Malásia	36.4	51.8	+15.5	Holanda	92.8	92.9	+0.1
Guatemala	1.1	15.9	+14.8	Camboja	0.0	0.0	+0.0
Colômbia	37.8	52.6	+14.8	Vietnã	0.0	0.0	+0.0
Arábia Saudita	65.9	80.4	+14.5	Líbia	0.0	0.0	+0.0
França	46.8	61.1	+14.3	Nigéria	0.0	0.0	+0.0
Filipinas	4.0	15.9	+11.9	Taiwan	0.0	0.0	+0.0
Kuwait	77.2	88.9	+11.7	Emirados Árabes	80.8	80.4	-0.3
Tchéquia	48.0	59.0	+11.0	Israel	84.1	83.0	-1.1
México	9.4	18.2	+8.8	Tailândia	7.6	5.7	-2.0
Austrália	88.5	97.3	+8.8	Suíça	98.9	93.0	-6.0
Noruega	78.9	86.8	+7.9	Turquia	8.5	2.4	-6.2
Alemanha	78.3	85.8	+7.5	Japão	96.3	89.8	-6.4
Estados Unidos	71.8	79.3	+7.4	Lituânia	77.5	70.2	-7.3
Bulgária	52.4	59.7	+7.4	África do Sul	68.4	59.0	-9.4
Bélgica	39.6	46.7	+7.2	Reino Unido	90.1	80.2	-9.9
Itália	30.5	37.5	+7.0	Chile	85.5	74.4	-11.1
Finlândia	91.6	98.4	+6.9	Áustria	68.9	57.0	-11.9
Polônia	12.9	19.0	+6.1	China	20.9	0.0	-20.9
Espanha	35.4	41.2	+5.8	Hungria	76.8	41.6	-35.2
Grécia	54.6	59.1	+4.4	Marrocos	46.3	10.9	-35.4
Croácia	0.4	4.8	+4.4	Líbano	38.0	0.0	-38.0
Nova Zelândia	95.4	98.9	+3.5	Coreia do Sul	78.9	22.4	-56.5
Eslováquia	34.7	37.4	+2.7				

Elaboração própria. Nota: participação do valor exportado de alumínio dirigida a destinos com qualidade regulatória inferior à do exportador (WGI), excluída a China. Ordenado por variação.