



Impactos na qualidade do ar da usina siderúrgica Ternium Brasil Santa Cruz

Jamie Kelly
Vera Tattari
Kaiyu Chen
Erika Uusivuori

8/2024

Impactos na qualidade do ar da usina siderúrgica Ternium Brasil Santa Cruz

29 Agosto 2024

Autores

Jamie Kelly

Vera Tattari

Kaiyu Chen

Erika Uusivuori

Editor

Hannah Ekberg

Tradutor

Luiza Tanuri

Designer

Wendi Wu

Sobre o CREA

O Centro de Pesquisa em Energia e Ar Limpo (CREA) é uma organização de pesquisa independente focada em revelar as tendências, causas e impactos na saúde, assim como soluções para a poluição do ar. O CREA utiliza dados científicos, pesquisas e evidências para apoiar os esforços de governos, empresas e organização de campanha em todo o mundo em seus esforços para avançar em direção a energia limpa e ar limpo, acreditando que pesquisa e comunicação eficazes são as chaves para políticas bem-sucedidas, decisões acerca de investimentos e esforços de defesa. O CREA foi fundado em Helsínquia e conta com colaboradores em vários países asiáticos e europeus.

Aviso

O CREA é politicamente independente. As designações utilizadas e a apresentação do material em mapas contidos neste relatório não implicam a expressão de qualquer opinião sobre o estatuto jurídico de qualquer país, território, cidade, área, ou das suas autoridades, ou sobre a delimitação das suas fronteiras ou limites territoriais.

Os pontos de vista e opiniões expressos nesta publicação são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente a política ou posição oficial, nem representam os pontos de vista ou opiniões, do Centro de Pesquisa em Energia e Ar Limpo (CREA), ou de seus membros e/ou ou financiadores. O CREA não assume nenhuma responsabilidade por quaisquer erros ou omissões no conteúdo desta publicação.

Impactos na qualidade do ar da usina siderúrgica Ternium Brasil Santa Cruz

Principais conclusões

- Este relatório avalia como as emissões da usina siderúrgica localizada em Santa Cruz, Rio de Janeiro, atualmente conhecida como Ternium Brasil Santa Cruz (anteriormente CSA Cia Siderúrgica do Atlântico), afetaram a qualidade do ar, a saúde pública e a economia durante suas operações a partir de 2010 a 2023.
- A siderúrgica Ternium Brasil emite níveis perigosos de poluentes atmosféricos tóxicos em uma ampla região, estendendo-se até o território de São Paulo.
- A exposição aos poluentes emitidos pela Ternium Brasil gerou um impacto devastador na saúde da população local.
- Alguns dos impactos estimados à saúde causados pela exposição à poluição da Ternium Brasil incluem 100 (70–150) visitas ao pronto-socorro devido à asma, 300 (60–700) novos casos de asma em crianças, 1.100 (300–2.400) crianças sofrendo de asma, 60 (20–110) nascimentos prematuros, 60 (20–110) peso neonatal baixo e 120.000 (100.000–140.000) dias de ausência ao trabalho.
- Além disso, estima-se que a poluição do ar proveniente desta usina tenha causado 1.200 (775–1.750) mortes devido a doenças, incluindo acidente vascular cerebral, infecções respiratórias baixas, doença pulmonar obstrutiva crônica, câncer de pulmão e diabetes - isto inclui a morte de aproximadamente 35 (10–65) crianças menores de 5 anos.
- Considerando esses resultados de saúde, a poluição do ar causada pela Ternium Brasil poderia ter custado à sociedade US\$ 1,8 (1,2–2,7) bilhões, ou R\$ 9,1 (5,8–13,2) bilhões.

- Para contextualizar, os custos econômicos devido à poluição do ar da Ternium Brasil excedem as despesas combinadas do Rio de Janeiro em educação, cultura e esportes durante um ano inteiro (R\$ 8 bilhões) (Statista, 2023).
- No geral, a instalação siderúrgica da Ternium Brasil, que é alimentada por combustíveis sujos, incluindo carvão e coque, e não possui medidas de controle da poluição do ar, teve um impacto devastador na saúde pública e na economia, incluindo milhões de dólares em danos à saúde.

Sumário

Principais conclusões	3
Sumário	5
Introdução	6
Resultados	9
Níveis ambientais de poluição	9
Impactos da poluição na saúde	10
Impactos econômicos da poluição	12
Metodologia	13
Emissões poluentes	13
Modelagem atmosférica	16
Avaliação do impacto econômico e na saúde	17
Referências bibliográficas	21

Introdução

A poluição do ar tem um impacto negativo no meio ambiente global, na saúde pública e na economia. A exposição a poluentes atmosféricos, como partículas (PM_{2,5}), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂), leva a impactos negativos em quase todos os principais sistemas e órgãos do corpo humano, incluindo os respiratórios, cardiovasculares e sistemas reprodutivos, bem como cérebro, coração e pulmões. Os resultados de saúde variam desde a asma em adultos e crianças, até nascimentos prematuros e de baixo peso em mulheres grávidas, e ausências no trabalho devido a doenças respiratórias. Em alguns casos, a exposição à poluição atmosférica pode até levar à morte, através de doenças que incluem doença cardíaca isquêmica, doença pulmonar obstrutiva crônica, câncer do pulmão, infecções respiratórias baixas e diabetes (Lelieveld et al., 2019; Di et al., 2017; OMS, 2021).

Globalmente, todos os anos, os impactos da exposição à poluição atmosférica incluem 2 milhões de casos de asma pediátrica (Anenberg et al., 2022), um bilhão de dias de ausências no trabalho (OCDE, 2016) e mais de 6 milhões de mortes (Lelieveld et al., 2019). Como resultado destas consequências para a saúde, a poluição atmosférica custa à economia global 8 bilhões de dólares (Banco Mundial, 2022).

No Brasil, a exposição ao PM_{2,5} leva a 58.000 mortes e US\$ 52 bilhões em danos à saúde a cada ano (Banco Mundial, 2022). Em muitas regiões do país, os níveis de poluentes excedem os valores de orientação estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (IQAir, 2021; Li & Zhu, 2014).

A indústria siderúrgica emite tanto gases com efeito de estufa, que contribuem para as alterações climáticas, quanto poluentes atmosféricos tóxicos, que são prejudiciais para a saúde humana (Dai et al., 2015). Os poluentes atmosféricos tóxicos emitidos durante a produção de aço incluem óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (PM), compostos orgânicos voláteis (VOCs) e metais pesados. Os poluentes são emitidos durante todo o processo de produção do aço, inclusive durante a coqueificação, sinterização, fabricação de ferro, fabricação de aço e acabamento (Conejo et al., 2020; He & Wang, 2017). A indústria siderúrgica é responsável por mais de 5% do consumo mundial de energia e é o principal consumidor de energia no setor industrial (Conejo et al., 2020; Li &

Zhu, 2014). Como consequência, a produção de aço é responsável por cerca de 11% das emissões globais de CO₂ (Carbon Brief, 2021).

Estudos de campo revelaram altos níveis de poluição do ar em torno de instalações siderúrgicas na América do Norte, Coreia do Sul e Nigéria (Kousehlar & Widom, 2020; Owoade et al., 2015). Uma pesquisa anterior do CREA concluiu que as emissões da indústria siderúrgica europeia provocam 2.570 mortes por ano, o que representa um encargo econômico de 7 bilhões de euros (Myllyvirta et al., 2023). Os componentes metálicos PM_{2.5} estão associados a alterações agudas na fisiologia cardiovascular e respiratória, induzindo aumentos na pressão arterial e perda da função pulmonar em até 4% de sua capacidade total (Cakmak et al., 2014). Além disso, o segmento de refinamento do benzol da indústria siderúrgica, que é uma importante fonte de emissões de benzeno, pode levar ao câncer (Dehghani et al., 2018). Os impactos na saúde da poluição atmosférica causada pelo aço têm um enorme custo para a sociedade, através de reduções na oferta de mão-de-obra e aumentos nos custos do tratamento médico (Yao et al., 2020).

O Brasil desempenha um papel crucial no setor siderúrgico global. A demanda por aço no Brasil aumentou 4,5% ao ano de 1970 a 2013 (Torres de Souza & Pacca, 2021). Além disso, 40% do aço produzido no país é exportado, tornando o Brasil o 6º maior exportador líquido (Torres de Souza & Pacca, 2021). Como resultado, a indústria siderúrgica desempenha um papel importante na economia brasileira e tornou-se bem-sucedida devido à elevada disponibilidade de minério de ferro de alta qualidade, ao baixo custo da mão-de-obra e à posição do país numa localização logisticamente favorável (IndustriAll, 2022). Existem 31 siderúrgicas em todo o país, localizadas em 10 estados diferentes (Trovão et al., 2022). Estas siderúrgicas funcionam principalmente com carvão importado de baixa qualidade e, quando queimados, emitem grandes quantidades de CO₂ (IEA, 2023). Atualmente, este setor é responsável por cerca de 25% das emissões industriais de GEE do país (Hebeda et al., 2023). Em 2023, 38-52 milhões de toneladas de CO₂ foram emitidas pelo setor siderúrgico do Brasil (GEM, 2024). Os perigosos impactos climáticos do setor siderúrgico brasileiro poderiam ser reduzidos usando gás siderúrgico para produzir eletricidade, instalando tecnologia de têmpera de coque seco e substituindo o fornecimento de minério de manganês na produção de aço (Trovão et al., 2022).

A empresa siderúrgica Ternium foi fundada em 2005 e é uma produtora líder de aço nas Américas, produzindo cerca de 12,5 milhões de toneladas de aço bruto e gerando lucros

anuais de US\$ 16 bilhões (Ternium, 2023b; Macrotrends, 2024). Possui 18 unidades de produção localizadas na Argentina, Brasil, Colômbia, Guatemala, México e Estados Unidos. A Ternium colabora com a maior siderúrgica do Brasil, a Usiminas, em seu controle de qualidade. A empresa possui instalações que atendem todas as etapas da produção do aço, desde a mineração do minério de ferro até a criação dos produtos finais (Ternium, 2023a). A Ternium foi classificada no percentil 90 na indústria básica de fabricação de ferro e aço com base em suas políticas, procedimentos e ações relacionadas a práticas ambientais e trabalhistas, compras sustentáveis e éticas (Ternium, 2023b).

A siderúrgica localizada em Santa Cruz, no Rio de Janeiro, foi inaugurada em 2010 pela corporação CSA Cia Siderúrgica, que era uma consórcio entre a Vale e a Thyssenkrupp. Em 2016, a Vale vendeu sua participação na CSA Cia Siderúrgica para a Thyssenkrupp, tornando esta última a única proprietária da usina. Em 2017, a CSA Cia Siderúrgica foi vendida para a Ternium. Tem capacidade de 5.200 mil toneladas (TTPA) – ou 5 milhões de toneladas – de aço por ano. A planta utiliza um alto-forno e um conversor de oxigênio em sua produção de aço na produção de aço. Os usuários finais do aço da instalação incluem os setores automóvel, construção e infraestruturas, energia, ferramentas e maquinaria e transportes (GEM, 2023).

Neste relatório de avaliação de impacto na saúde (HIA), estimamos como as emissões da usina siderúrgica Ternium Brasli, localizada no bairro de Santa Cruz no Rio de Janeiro (Brasil), contribuíram para a poluição do ar (NO_2 , SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$), e como a exposição a estes poluentes afetou a saúde pública e a economia durante o período em que a usina esteve em funcionamento (2010–2023). Para conseguir isso, utilizamos as emissões de poluentes relatadas pela Ternium Brasil em um modelo de poluição do ar padrão da indústria (Exponent, 2015) que nos permite calcular os níveis de poluentes na atmosfera, seguido pela combinação dos níveis de exposição aos poluentes com dados revisados por pares sobre a relação entre a poluição do ar e os resultados de saúde (Myllyvirta, 2020). Esta metodologia, bem como as ferramentas específicas, são amplamente utilizadas por cientistas e governos em todo o mundo (Schucht et al., 2021; EPA, 2011; Zhang et al., 2019) e baseiam-se em dados que foram estabelecidos através de décadas de pesquisa científica. Consulte a seção Metodologia para obter uma descrição detalhada.

Resultados

Níveis ambientais de poluição

Para este estudo, simulamos como a siderúrgica Ternium Brasil contribui para a formação dos poluentes atmosféricos $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , e SO_2 . A Figura 1 mostra o impacto das emissões da Ternium Brasil na média local anual de $\text{PM}_{2.5}$. Nas imediações da usina Ternium, as concentrações médias anuais de $\text{PM}_{2.5}$ atingem $0,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No entanto, como o poluente $\text{PM}_{2.5}$ pode permanecer na atmosfera por até duas semanas, a poluição não afeta apenas as comunidades locais. Níveis moderados de $\text{PM}_{2.5}$ ($0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) atingem a zona metropolitana oeste do Rio de Janeiro, enquanto a principal pluma de poluição é transportada em direção ao sudoeste do estado, quase chegando ao estado de São Paulo. As emissões da Ternium Brasil levam à formação de múltiplos poluentes na atmosfera que têm impactos de longo alcance sobre a população brasileira.

Annual mean $\text{PM}_{2.5}$ from Ternium Brasil steel facility

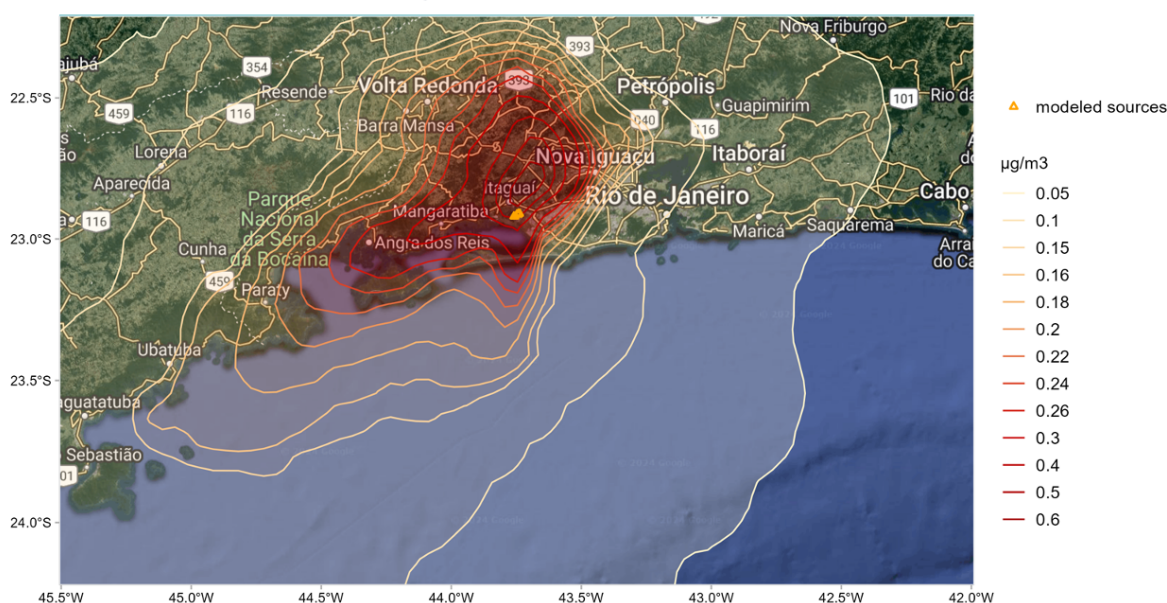


Figura 1 – Concentração média anual de PM_{2,5} da usina siderúrgica Ternium Brasil

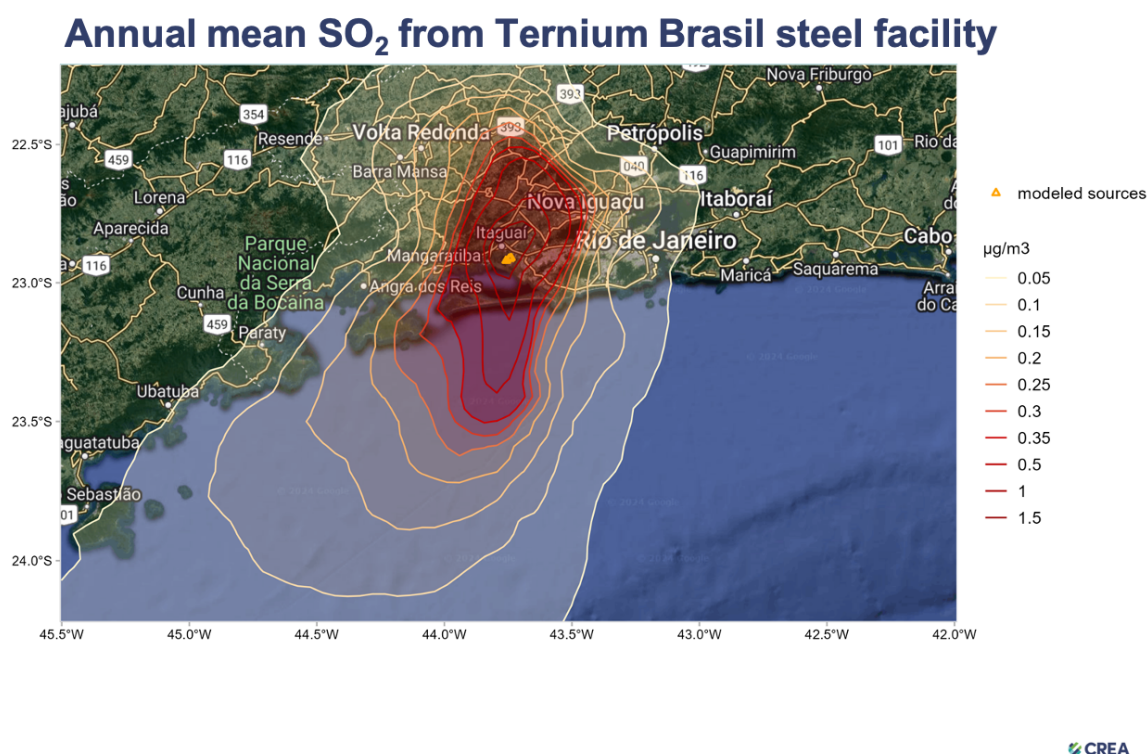


Figura 2 – Concentração média anual de SO₂ da usina siderúrgica Ternium Brasil

Impactos da poluição na saúde

Para este estudo, calculamos como a exposição humana aos poluentes atmosféricos (PM_{2,5}, NO₂ e SO₂) emitidos pela usina siderúrgica de Santa Cruz, Rio de Janeiro, atualmente conhecida como Ternium Brasil Santa Cruz (antiga CSA Cia Siderúrgica do Atlântico), afeta a saúde pública e a economia. A Tabela 1 mostra as mortes estimadas causadas pela poluição da Ternium, integradas ao longo de todo o período de operação (2010–2023). Estima-se que a exposição a todos os poluentes (PM_{2,5}, NO₂ e SO₂) tenha levado a 1.200 (775–1.750) mortes, com o intervalo refletindo os intervalos de confiança superior e inferior das funções dose-resposta do poluente (Tabela 5). Para PM_{2,5}, temos um detalhamento sobre as causas das mortes, com estimativas indicando que este poluente

causou mais de 330 mortes entre a população adulta devido a doença cardíaca isquêmica (160), acidente vascular cerebral (70), infecções respiratórias inferiores (35), doença pulmonar obstrutiva crônica (30), câncer de pulmão (15) e diabetes (10), bem como infecções respiratórias inferiores em crianças menores de 5 anos (35).

Tabela 1 – Mortes por exposição à poluição atmosférica da siderúrgica Ternium Brasil (2010–2023)

Causa de morte	Poluente	Grupo etário	Taxas de mortalidade
Mortalidade por todas as causas	PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂	Adultos e crianças	1,200 (775–1,750)
Mortalidade por todas as causas	PM _{2.5}	Adultos e crianças	330 (240–445)
Mortalidade por todas as causas	NO ₂	Adultos e crianças	720 (440–1,090)
Mortalidade por todas as causas	SO ₂	Adultos e crianças	150 (90–215)
Doença cardíaca isquêmica	PM _{2.5}	Adultos	160 (120–200)
AVC	PM _{2.5}	Adultos	70 (25–120)
Infecções respiratórias inferiores	PM _{2.5}	Adultos	35 (10–65)
Doença pulmonar obstrutiva crônica	PM _{2.5}	Adultos	30 (10–55)
Câncer de pulmão	PM _{2.5}	Adultos	15 (10–30)
Diabetes	PM _{2.5}	Adultos	10 (2–17)
Infecções respiratórias inferiores	PM _{2.5}	Crianças	35 (10–65)

A Tabela 2 mostra os impactos da poluição do ar da usina siderúrgica Ternium Brasil Santa Cruz (operando como CSA Cia Siderúrgica do Atlântico de 2010 a 2017) nos resultados de morbidade humana de 2010 a 2023. A poluição do ar danifica gravemente o sistema respiratório e, em particular, os pulmões. Como resultado, estima-se que a poluição do ar da Ternium Brasil tenha levado a 100 (70-150) visitas ao pronto-socorro devido à asma. As crianças são particularmente sensíveis a estes impactos na saúde, uma vez que os seus pulmões estão subdesenvolvidos. Consequentemente, estima-se que a poluição atmosférica da usina de Santa Cruz tenha resultado em 300 (60-700) novos casos de asma em crianças e aproximadamente 1.100 (300-2.400) crianças sofrendo de asma em geral. As mulheres grávidas são particularmente suscetíveis aos impactos negativos da poluição devido aos efeitos da poluição do ar no sistema reprodutivo e nos fetos. Por causa disso, estima-se que a poluição do ar da Ternium Brasil tenha causado 60 (20-110) nascimentos prematuros e 60 (20-110) nascimentos com peso reduzido. Como resultado do grande impacto na saúde pública, estima-se que a poluição atmosférica causada pela Ternium tenha levado a 120.000 (100.000-140.000) dias de ausências ao trabalho.

Tabela 2 – Impactos na mortalidade devido à exposição à poluição atmosférica da usina siderúrgica Ternium Brasil (2010-2023)

Resultado de saúde	Taxa
Visitas ao pronto-socorro devido a asma	100 (70-150)
Novos casos de asma em crianças	300 (60-700)
Número de crianças que sofrem de asma	1,100 (300-2,400)
Nascimentos com baixo reduzido	60 (20-110)
Nascimentos prematuros	90 (45-100)
Ausências ao trabalho (dias de licença médica)	120,000 (100,000-140,000)

Impactos econômicos da poluição

Os impactos à saúde devido à poluição do ar proveniente da usina siderúrgica Ternium Brasil Santa Cruz (antiga CSA Cia Siderúrgica do Atlântico) têm um impacto significativo na economia. Estima-se que a poluição atmosférica das operações de 2010 a 2023 da instalação de Santa Cruz tenha custado à sociedade 1,8 (1,2-2,7) mil milhões de dólares, o que equivale a 9,1 (5,8-13,2) bilhões de reais. Para efeito de comparação, esse custo supera as despesas combinadas do Rio de Janeiro com educação, cultura e esportes durante um ano inteiro (R\$8 bilhões) (Statista, 2023).

Tabela 3 – Custo econômico dos danos à saúde devido à exposição à poluição atmosférica da usina siderúrgica Ternium Brasil

Moeda	2010-2023
USD	1.8 (1.2–2.7) bilhões
BRL	9.1 (5.8–13.2) bilhões

Metodologia

Neste estudo, estimamos como as emissões de poluentes da usina siderúrgica Ternium Brasil afetaram a qualidade do ar, a saúde pública e a economia, enquanto esta instalação estava em operação entre 2010 e 2023. Primeiramente, recuperamos dados de emissões poluentes de documentos oficiais da Ternium. Em segundo lugar, utilizamos um modelo meteorológico e de dispersão atmosférica para simular como as emissões da instalação são transportadas na atmosfera, gerando mapas de distribuição de poluentes. Em terceiro lugar, calculamos a forma como a exposição aos poluentes afeta a saúde pública, combinando os mapas de concentrações de poluentes com dados que descrevem a toxicidade dos poluentes e dados populacionais (por exemplo, densidade populacional, idade, incidência inicial de saúde, etc.).

Emissões poluentes

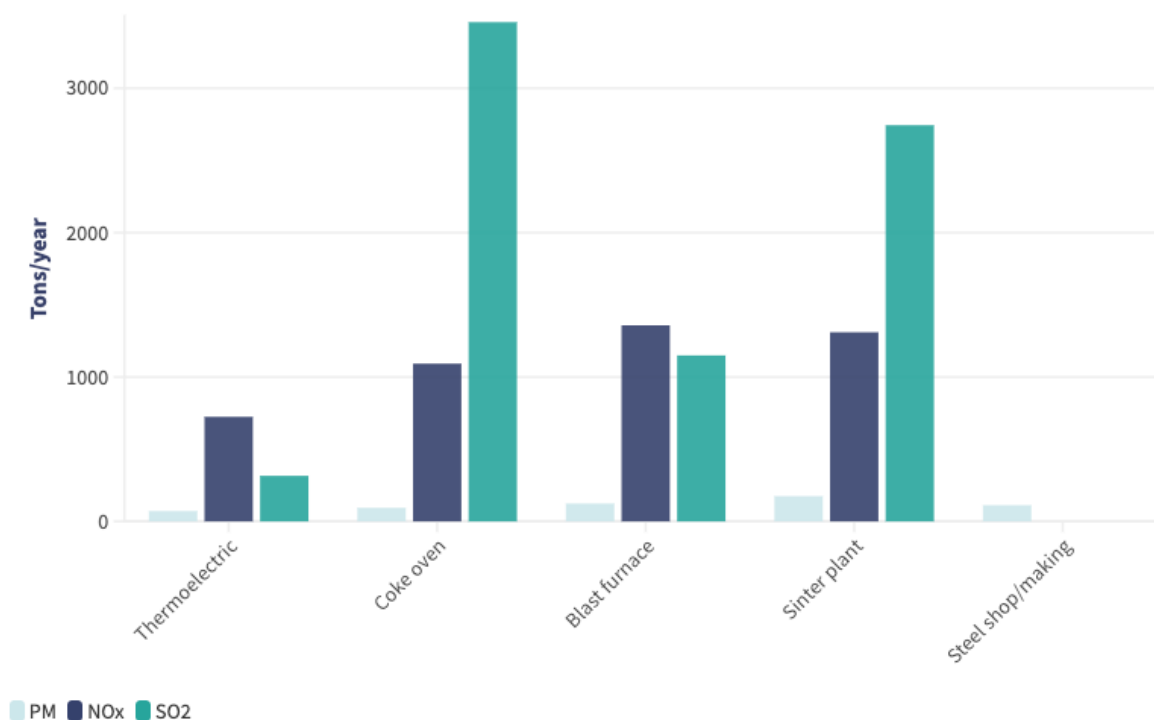
A partir de documentos oficiais da Ternium Brasil (Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2021), obtivemos dados sobre emissões de poluentes e características das chaminés. Os resultados dessa coleta de dados estão apresentados na Tabela 4, Tabela 5 e Figura 3.

Tabela 4 – Informações sobre as chaminés

Chaminé	Tipo	Localização		Altura	Diâmetro	Volume de gás de combustão	Temperatura dos gases de combustão
		Latitude	Longitude				
GT 11	Termoelétrica	22°54'40.69"S	43°44'41.66"W	40	5.50	641240.7273	150
GT 12	Termoelétrica	22°54'40.69"S	43°44'41.66"W	40	5.6	512992.5818	150
Coqueria FGD A	Forno de coque	22°55'9.94"S	43°45'25.59"W	60	4.5	388048	150
Coqueria FGD B	Forno de coque	22°55'9.94"S	43°45'25.59"W	60	4.5	388048	150
Coqueria FGD C	Forno de coque	22°55'9.94"S	43°45'25.59"W	60	4.5	388048	150
Britador de carvão (C17)	Forno de coque	22°55'9.94"S	43°45'25.59"W	15	1.2	21600	30
Carregamento de Carvão (C85) A	Forno de coque	22°55'9.94"S	43°45'25.59"W	20	1.5	52000	30
Carregamento de Carvão (C85) B	Forno de coque	22°55'9.94"S	43°45'25.59"W	20	1.5	52000	30
Carregamento de Carvão (C85) C	Forno de coque	22°55'9.94"S	43°45'25.59"W	20	1.5	52000	30
Casa de estocagem	Alto-forno	22°54'36.09"S	43°44'23.29"W	35	3.6	512640	30

Casa de corrida	Alto-forno	22°54'36.09 "S	43°44'23.29 "W	35	5.39	1440000	30
Poço de emergência	Alto-forno	22°54'36.09 "S	43°44'23.29 "W	40	3.2	360000	30
Altos fornos 1/regenerador 1	Alto-forno	22°54'36.09 "S	43°44'23.29 "W	60	4.5	388048	150
Altos fornos 2/regenerador 2	Alto-forno	22°54'36.09 "S	43°44'23.29 "W	60	4.5	388048	150
PCI 1	Alto-forno	22°54'36.09 "S	43°44'23.29 "W	63	1.5	60000	30
PCI 2	Alto-forno	22°54'36.09 "S	43°44'23.29 "W	63	1.5	60000	30
Despoeiramento primário (PE1)	Planta de sinterizaç ão	22°54'47.96 "S	43°44'36.90 "W	85	5.5	979200	150
Despoeiramento secundário (PE2)	Planta de sinterizaç ão	22°54'47.96 "S	43°44'36.90 "W	60	3.3	360000	30
Secundário da aciaria	Oficina de aço/fabric ação	22°54'31.79 "S	43°44'19.65 "W	30	6.8	1225600	30

Emissions from different sources at Ternium Brasil steel plant



Source: CREA, 2024

Figura 3 – Emissões de diferentes fontes na usina siderúrgica Ternium Brasil

Tabela 5 – Emissões totais anuais de poluentes da usina siderúrgica Ternium Brasil

Poluente	Emissão anual (toneladas/ano)
PM _{2.5}	520
NO _x	4,490
SO ₂	7,670

Modelagem atmosférica

Para este estudo, simulamos as concentrações de poluentes atmosféricos usando o modelo de dispersão atmosférica CALPUFF, versão 7 (Scire et al., 2000; Exponent, 2015). O CALPUFF tem sido um modelo padrão amplamente utilizado na indústria para avaliar os impactos de longo alcance na qualidade do ar provenientes de fontes pontuais, e é usado tanto por reguladores, como a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (US EPA) (US EPA, 2023), quanto em pesquisas acadêmicas (Zhang et al., 2020). Devido à sua capacidade de capturar os complexos processos químicos e o transporte atmosférico de poluentes, a US EPA aprova oficialmente o uso do modelo CALPUFF para investigar casos em que uma fonte de emissão se espera que leve ao transporte de poluição de longo alcance (US EPA, 2023). O modelo foi avaliado extensivamente pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA, é de código aberto e totalmente documentado. O modelo CALPUFF foi aplicado em muitas regiões ao redor do mundo, incluindo os Estados Unidos (Rzeszutek, 2019), Europa (Holnicki et al., 2016), América Central (Hernández-Garcés et al., 2020), América do Sul (Arregocés et al., 2023), Oriente Médio (Ghannam & El-Fadel, 2013), Ásia (Zhou et al., 2003; Jittra et al., 2015) e África (Affum et al., 2016).

O CALPUFF calcula o transporte atmosférico, a dispersão, a transformação química e a deposição dos poluentes, e as concentrações incrementais resultantes ao nível do solo atribuídas às fontes de emissão estudadas. As transformações químicas de SO_2 e NO_2 para $\text{PM}_{2,5}$ são calculadas usando o ISORROPIA. As concentrações de fundo de oxidantes (ozônio, amônia, peróxido de hidrogênio) são obtidas a partir de um modelo global de química atmosférica. Os dados meteorológicos para o ano de 2021 foram gerados a partir do modelo Weather Research Forecasting (WRF) (Skamarock et al., 2008), versão 4.2.2. O WRF foi configurado com 33 níveis verticais e 2 grades aninhadas. O nível principal possui uma resolução de grade de 15 km e abrange 1.500 km tanto na direção norte-sul quanto na direção leste-oeste. O nível interno possui uma resolução de grade de 3 km, abrange 300 km tanto na direção norte-sul quanto na direção leste-oeste, e está centrado sobre a usina siderúrgica da Ternium Brasil.

Os domínios principal e interno utilizam uma técnica de aninhamento bidirecional, que garante a interação dinâmica entre eles. As simulações do WRF usam condições iniciais e de fronteira lateral do conjunto de dados Climate Forecast System Reanalysis (CFRS) dos National Centers for Environmental Prediction (NCEP), da National Oceanic and

Atmospheric Administration (NOAA), produzindo dados meteorológicos tridimensionais e horários que cobrem o ano calendário completo de 2021.

Para a avaliação das concentrações anuais médias de poluentes, assume-se que as emissões são constantes ao longo do ano. As emissões de cada uma das dez unidades foram modeladas como fontes de área separadas. As usinas de energia foram modeladas como fontes pontuais de efeito de chaminé, levando em consideração a altura das chaminés e a elevação da pluma térmica das chaminés.

Avaliação do impacto econômico e na saúde

Com base nas distribuições espaciais dos poluentes simuladas pelo modelo de dispersão atmosférica CALPUFF, calculamos os impactos públicos e econômicos correspondentes para o ano de 2022. O CREA desenvolveu um detalhado quadro de avaliação de impacto na saúde (HIA) globalmente aplicável, baseado na ciência mais recente (Myllyvirta, 2020). Este quadro inclui o conjunto mais completo possível de desfechos de saúde, sem sobreposições óbvias.

A ênfase está em resultados para os quais há dados de incidência disponíveis em nível nacional a partir de conjuntos de dados globais, e desfechos que têm alta relevância para os custos de saúde e a produtividade do trabalho. Esses resultados de saúde foram selecionados e quantificados de uma maneira que permite a avaliação econômica, ajustada pelos níveis de produção econômica e renda em diferentes jurisdições.

Para cada resultado de saúde avaliado, selecionamos uma relação concentração-resposta que tem sido utilizada para quantificar o impacto da poluição do ar na saúde em nível global, conforme descrito na literatura científica revisada por pares. Isto indica que a evidência é suficientemente madura para ser aplicada em diversas geografias e níveis de exposição. O cálculo dos impactos na saúde segue um cálculo epidemiológico padrão:

$$\Delta \text{casos} = \text{Pop} \times \sum_{\text{idade}} \left[\text{Frac}_{\text{idade}} \times \text{Incidência}_{\text{idade}} \times \frac{RR_{c, \text{idade}} - 1}{RR_{c, \text{idade}}} \right],$$

Onde:

Pop é a população total na localização da grade;

$idade$ é a faixa etária analisada; no caso de funções concentração-resposta dependentes da idade, um segmento etário de 5 anos; nos demais casos, a faixa etária total a que a função é aplicável;

$Frac_{idade}$ é a fração da população pertencente à faixa etária analisada;

$Incidência$ é a incidência basal da condição de saúde analisada;

c é a concentração de poluentes, com c_{base} referindo-se à concentração basal ou à concentração ambiente atual; e,

$RR_{conc, idade}$ é a função que fornece a razão de risco do resultado de saúde analisado numa determinada concentração para um determinado grupo etário em comparação com o ar limpo. No caso de uma função concentração-resposta log-linear, não específica para a idade, a função RR torna-se:

$$RR(c) = RR_0 c - c_0 \Delta c_0 \text{ quando } c > c_0, 1 \text{ de outra forma}$$

Onde:

RR_0 é a razão de risco encontrada em pesquisas epidemiológicas;

Δc_0 é a variação de concentração à qual RR_0 se refere; e,

c_0 é a concentração assumida como não prejudicial — em geral, a menor concentração encontrada nos dados do estudo.

Dados sobre a população total e a estrutura etária da população foram obtidos a partir dos resultados do Global Burden of Disease para 2019 (Murray et al., 2020), acessados pelo Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME, 2020). A distribuição espacial da população dentro de cada cidade e país, conforme projetada para 2020, foi baseada no Gridded Population of the World v4 do Center for International Earth Science Information Network (CIESIN, 2018).

As mortes de adultos foram estimadas utilizando as funções de risco desenvolvidas por Burnett et al. (2018), conforme aplicadas por Lelieveld et al. (2019). As mortes de crianças pequenas com menos de cinco anos devido a infecções respiratórias inferiores associadas à poluição por $PM_{2.5}$ foram avaliadas usando a função de risco do Global Burden of Disease para doenças respiratórias inferiores (IHME, 2020). Para todos os resultados de mortalidade, os dados específicos por causa foram obtidos dos resultados do projeto Global Burden of Disease para 2019 (IHME, 2020).

A modelagem de impactos na saúde projeta os efeitos da exposição aos poluentes durante o ano do estudo. Alguns impactos na saúde são imediatos, como a exacerbação dos sintomas de asma e os dias de trabalho perdidos, enquanto outros impactos crônicos podem ter uma latência de vários anos. As relações concentração-resposta para visitas a salas de emergência por asma e ausências no trabalho foram baseadas em estudos que avaliaram variações diárias nas concentrações de poluentes e resultados de saúde; essas relações foram aplicadas às mudanças nas concentrações médias anuais. Uma visão geral dos dados de entrada para estimar os impactos da poluição do ar na saúde pública está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros de entrada e dados utilizados na estimativa dos impactos na saúde física

Faixa etária	Efeito	Poluente	Função de concentração-resposta	Mudança de concentração	Limite sem risco	Referência	Dados de incidência
1-18	Novos casos de asma	NO_2	1.26 (1.10 – 1.37)	10 ppb	2 ppb	Khreis et al. (2017)	Achakulwisut et al. (2019)
0-17	Visitas ao pronto-socorro de asma	$PM_{2.5}$	1.025 (1.013 – 1.037)	$10 \mu g/m^3$	$6 \mu g/m^3$	Zheng et al. (2015)	Anenberg et al. (2018)
18-99	Visitas ao pronto-socorro de asma	$PM_{2.5}$	1.023 (1.015 – 1.031)	$10 \mu g/m^3$	$6 \mu g/m^3$	Zheng et al. (2015)	Anenberg et al. (2018)
Newborn	Nascimento prematuro	$PM_{2.5}$	1.15 (1.07 – 1.16)	$10 \mu g/m^3$	$8.8 \mu g/m^3$	Sapkota et al. (2012)	Chawanpaiboon et al. (2018)

20-65	Ausência do trabalho	PM _{2.5}	1.046 (1.039 – 1.053)	10 µg/m ³	N/A	WHO (2013)	EEA (2014)
0-4	Mortes por infecções respiratórias inferiores	PM _{2.5}	IHME (2020)		5.8 µg/m ³	IHME (2020)	IHME (2020)
25-99	Mortes por doenças não transmissíveis, desagregadas por causa, e por infecções respiratórias inferiores	PM _{2.5}	Burnett et al. (2018)		2.4 µg/m ³	Burnett et al. (2018)	IHME (2020)
25-99	Incapacidade causada por diabetes, acidente vascular cerebral e doença respiratória crônica	PM _{2.5}	IHME (2020)		2.4 µg/m ³	Burnett et al. (2018)	IHME (2020)
25-99	Mortes prematuras	NO ₂	1.02 (1.01 – 1.04)	10 µg/m ³	4.5 µg/m ³	Huangfu & Atkinson. (2020); NRT from Stieb et al. (2021)	IHME (2020)
25-99	Mortes prematuras	SO ₂	1.02 (1.01–1.03)	5 ppb	0.02 ppb	Krewski et al. 2009	IHME 2020

Nota: Valores numéricos na coluna 'Função de resposta à concentração' referem-se ao odds ratio (OR) correspondente ao aumento nas concentrações apresentadas na coluna 'mudança de concentração'. Referências na literatura indicam o uso de uma função de resposta à concentração não linear. O limite sem dano refere-se a uma concentração abaixo da qual o impacto na saúde não é quantificado, geralmente porque os estudos nos quais a função é baseada não incluíram pessoas com níveis de exposição mais baixos. Dados sobre relações concentração-resposta não estão disponíveis para todas as geografias, portanto, um modelo de risco global é aplicado a todas as cidades. Dados de incidência geralmente não estão disponíveis no nível da cidade, então médias nacionais devem ser aplicadas.

A poluição atmosférica aumenta o risco de desenvolvimento de doenças respiratórias e cardiovasculares e aumenta as complicações decorrentes das mesmas, reduzindo significativamente a qualidade de vida e a produtividade econômica das pessoas afetadas e aumentando os custos de saúde. As perdas econômicas devido à poluição atmosférica foram calculadas utilizando os métodos descritos em Myllyvirta et al. (2020). A avaliação

das mortes foi atualizada para os valores derivados de Viscusi e Masterman (2017), que se baseiam em dados do mercado de trabalho e prestam especial atenção à aplicabilidade em países de rendimento médio e baixo. O projeto Global Burden of Disease quantificou o grau de incapacidade causado por cada doença em um 'peso de deficiências' que pode ser usado para comparar os custos de diferentes enfermidades. O custo econômico de deficiências e da redução da qualidade de vida causados por essas doenças e deficiências é avaliado com base nos pesos de deficiências, combinados com a avaliação econômica da incapacidade utilizada pelo regulador ambiental do Reino Unido, DEFRA (Birchby et al., 2019), e ajustada pelo PIB per capita ajustado pela paridade do poder de compra (PPP) para a Indonésia. As mortes de crianças pequenas são avaliadas em o dobro do valor das mortes de adultos, seguindo as recomendações da OCDE (2012).

Referências bibliográficas

Affum, H. A., Akaho, E. H. K., Niemela, J. J., Armenio, V. & Danso, K. A. (2016). Validating the California Puff (CALPUFF) Modelling System Using an Industrial Area in Accra, Ghana as a Case Study. Open Journal of Air Pollution, Volume 5: 27-36. Published Online March 2016 in SciRes. https://www.scirp.org/pdf/OJAP_2016033109554592.pdf

Anenberg, S. C., Henze, D. K., Tinney, V., Kinney, P. L., Raich, W., Fann, N., Malley, C. S., Roman, H., Lamsal, L., Duncan, B., Martin, R. V., van Donkelaar, A., Brauer, M., Doherty, R., Jonson, J. E., Davila, Y., Sudo, K. & Kuylensstierna, J. C. I. (2018). Estimates of the Global Burden of Ambient PM_{2.5}, Ozone, and NO₂ on Asthma Incidence and Emergency Room Visits. Environmental Health Perspectives, Volume 126 (10).
<https://doi.org/10.1289/EHP3766>

Anenberg, S. C., Moheggh, A., Goldberg, D. L., Kerr, G. H., Brauer, M., Burkart, K., ... & Lamsal, L. (2022). Long-term trends in urban NO₂ concentrations and associated paediatric asthma incidence: estimates from global datasets. The Lancet Planetary Health, 6 (1): e49-e58.
<https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S2542-5196%2821%2900255-2>

Arregocés et al. (2023). Sensitivity of the CALMET-CALPUFF model system on estimating PM₁₀ concentrations at a mining site in northern Colombia.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266601642300107X>

Birchby, D., Stedman, J., Whiting, S. & Vedrenne, M. (2019). Air Quality Damage Cost Update 2019. 2019. Ricardo/ED59323/Issue Number 2.0.
https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/1902271109_Damage_cost_update_2018_FINAL_Issue_2_publication.pdf

Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., et al. (2018). Global Estimates of Mortality Associated with Long-Term Exposure to Outdoor Fine Particulate Matter. Proceeding of the National Academies of Science, 115 (38): 9592-9597.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>

Cakmak, S., Dales, R., Kauri, L. M., Mahmud, M., Van Ryswyk, K., Vanos, J., Liu, L., Kumarathan, P., Thomson, E., Vincent, R., & Weichenthal, S. (2014). Metal composition of

fine particulate air pollution and acute changes in cardiorespiratory physiology. *Environmental Pollution*, 189, 208-214. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.03.004>

Carbon Brief. (2021). Guest post: These 553 steel plants are responsible for 9% of global CO2 emissions. Swalec, C. Published on 29 June 2021. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-these-553-steel-plants-are-responsible-for-9-of-global-co2-emissions/>

Carvalho, A. (2022). Brazilian steel industry sees modest growth in 2023: Aço Brasil. S&P Global, Commodity Insights. <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/metals/113022-brazilian-steel-industry-sees-modest-growth-in-2023-ao-brasil>

CIESIN. (2018). Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals, Revision 11. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2018. <https://doi.org/10.7927/H4F47M65>

Conejo, A. N., Birat, J., & Dutta, A. (2020). A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. *Journal of Environmental Management*, 259, 109782. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109782>

Dai, Q. L., Bi, X. H., Wu, J. H., Zhang, Y. F., Wang, J., Xu, H., ... & Feng, Y. C. (2015). Characterization and source identification of heavy metals in ambient PM10 and PM2.5 in an integrated iron and steel industry zone compared with a background site. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(3), 875-887. <https://aaqr.org/articles/aaqr-14-09-0a-0226.pdf>

Dehghani, F., Omid, F., Heravizadeh, O., Chamgordani, S. B., Gharibi, V., & Manesh, A. S. (2018). Occupational health risk assessment of volatile organic compounds emitted from the coke production unit of a steel plant. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1443593>

Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., et al. (2017). Air Pollution and Mortality in the Medicare Population. *New England Journal of Medicine*, 376: www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmoa1702747

EPA. (U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation). (2011). The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020. (Published April 2011).
https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/fullreport_rev_a.pdf

Exponent. (2015). CALPUFF Modeling System. <http://www.src.com>

Ghannam, K. & El-Fadel, M. (2013). A framework for emissions source apportionment in industrial areas: MM5/CALPUFF in a near-field application. *Journal of the Air & Waste Management Association*, Volume 63 (2):190–204.
<https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/10962247.2012.739982?needAccess=true>

Global Energy Monitor (GEM). (2023). Ternium Guerrero San Nicolás de los Garza steel plant. [www.gem.wiki/Ternium Guerrero San Nicol%C3%A1s de los Garza steel plant](http://www.gem.wiki/Ternium_Guerrero_San_Nicol%C3%A1s_de_los_Garza_steel_plant)

Global Energy Monitor (2024). Forging a sustainable future: Brazil's opportunity to lead in steel decarbonization.

Government of the State of Rio de Janeiro. (2021). "Environmental Licensing Requirement." Institute of the Environment, Document No. EXT-PD/014.12178/2021.

He, K., & Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1022-1039.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>

Hebeda, O., Guimarães, B. S., Cretton-Souza, G., La Rovere, E. L., & Pereira, A. O. (2023). Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 401, 136675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136675>

Hernández-Garcés, A., Cécé, R., Ferrer-Hernández, A., Bernard, D., Jáuregui-Haza, U., Zahibo, N. & González, J. (2020). Intercomparison of FLEXPART and CALPUFF dispersion models. An application over a small tropical island.
<https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/52818>

Holnicki, P., Kałuszek, A., & Trapp, W. (2016). An urban scale application and validation of the CALPUFF model. *Atmospheric Pollution Research*, 7(3), 393-402.

<https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.016>

Huangfu, P. & Atkinson, R. (2020). Long-Term Exposure to NO₂ and O₃ and All-Cause and Respiratory Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environment International*, 144, 2020, 105998. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998>

IEA. (2023). Brazil aims to make a global impact on clean energy innovation, IEA, Paris. www.iea.org/commentaries/brazil-aims-to-make-a-global-impact-on-clean-energy-innovation

Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). (2020). GBD Results.

<http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>

IQAir. (2021). World's most polluted countries & regions.

<https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>

Industrial. (2022). An overview of the steel industry in Brazil and Economy Impacts.

<https://industrial.ai/blog/an-overview-of-the-steel-industry-in-brazil-and-its-impact-on-the-economy>

Jitra, N., Pinthong, N., & Thepanondh, S. (2015). Performance Evaluation of AERMOD and CALPUFF Air Dispersion Models in Industrial Complex Area.

<https://journals.sagepub.com/doi/epub/10.4137/ASWR.S32781>

Khreis, H., Kelly, C., Tate, J., Parslow, R., Lucas, K. & Nieuwenhuijsen, M. (2017). Exposure to Traffic-Related Air Pollution and Risk of Development of Childhood Asthma: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental International*, 100: 1-31.

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.012>

Kousehlar, M., & Widom, E. (2020). Identifying the sources of air pollution in an urban-industrial setting by lichen biomonitoring - A multi-tracer approach. *Applied Geochemistry*, 121, 104695. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104695>

Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R., Ma, R., Hughes, E., et al. (2009). Extended Follow-Up and Spatial Analysis of the American Cancer Society Study Linking Particulate Air Pollution and

Mortality. Research Reports Health Effects Institute, 140: 5-114.

http://westrk.org/CARBdocs/Krewski_052108.pdf

Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R., Haines, A., & Ramanathan, V. (2019). Effects of Fossil Fuel and Total Anthropogenic Emission Removal on Public Health and Climate. *Proceedings of the National Academies of Science*, 116 (15): 7192-7197.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>

Li, Y. & Zhu, L. (2014). Cost of energy saving and CO2 emissions reduction in China's iron and steel sector. *Applied Energy*, 130, 603-616.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.014>

Macrotrends. (2024). Ternium S.A Revenue 2010-2023 | TX.

www.macrotrends.net/stocks/charts/TX/ternium-sa/revenue

Murray, C. J. L., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., et al. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10258), 1223–1249.

[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)

Myllyvirta, L., Kelly, J. & Uusivuori, E. (2023). Upgrading Europe's Air: How a strong Industrial Emissions Directive can save lives and money. CREA. (Published in March 2023).

https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2023/04/CREA_Upgrading-Europe-s-Air.pdf

Myllyvirta, L. (2020). Quantifying the Economic Costs of Air Pollution from Fossil Fuels. Centre for Research on Energy and Clean Air. 2020.

<https://energyandcleanair.org/publications/costs-of-air-pollution-from-fossil-fuels/>

OECD. (2012). Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies.

<https://doi.org/10.1787/9789264130807-en>

OECD. (2016). FDI in Figures. Paris: Organisation for European Economic Cooperation

Owoade, K. O., Hopke, P. K., Olise, F. S., Ogundele, L. T., Fawole, O. G., Olaniyi, B. H., Jegede, O. O., Ayoola, M. A., & Bashiru, M. I. (2014). Chemical compositions and source

identification of particulate matter (PM_{2.5} and PM_{2.5-10}) from a scrap iron and steel smelting industry along the Ife-Ibadan highway, Nigeria. *Atmospheric Pollution Research*, 6(1), 107-119. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.013>

Rzeszutek. (2019). Parameterization and evaluation of the CALMET/CALPUFF model system in near-field and complex terrain - Terrain data, grid resolution and terrain adjustment method. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719329523>

Sapkota, A., Chelikowsky, A., Nachman, K., Cohen, A. & Ritz, B. (2012). Exposure to Particulate Matter and Adverse Birth Outcomes: A Comprehensive Review and Meta-Analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 5: 369-381. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0106-3>

Schucht, S., Real, E., Létinois, L., Colette, A., Holland, M., et al. (2021). Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2017. European Topic Centre on Air pollution, transport, noise and industrial pollution. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-04-2020-costs-of-air-pollution-from-european-industrial-facilities-200820132017>

Scire, J., Strimaitis, D. & Yamartino, R. (2000). A User's Guide for the CALPUFF dispersion model. https://www.eoas.ubc.ca/courses/atsc507/ADM/calpuff/CALPUFF_UsersGuide-v5-excellent.pdf

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., et al. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. University Corporation for Atmospheric Research. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>

Statista. (2023). Public expenditure of the city of Rio de Janeiro in 2021, per category. www.statista.com/statistics/1385788/rio-de-janeiro-public-spending/

Stieb D., Berjawi, R., Emode, M., Zheng, C., Salama, D., et al. (2021). Systematic Review and Meta-Analysis of Cohort Studies of Long Term Outdoor Nitrogen Dioxide Exposure and Mortality. *PLoS ONE*, 16(2): e0246451. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246451>

Ternium. (2023a). Our company. <https://us.ternium.com/en/company>

Ternium. (2023b). Sustainability report 2022. www.ternium.com/en/company

Torres De Souza, J. F. T., & Pacca, S. A. (2021). Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105517. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105517>

Trovão, R., Camillo, L., da Silva, G. & Kulay, L. (2022). Verifying the Environmental and Energy Feasibility of Potential Improvement Actions in the Steel Production Chain in Brazil. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. Volume 10, Issue 1, 1090390. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0390>

US EPA. (2023). Air Quality Dispersion Modeling — Alternative Models. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-alternative-models#calpuff>

Viscusi, W. K. & Masterman, C. J. (2017). Income Elasticities and Global Values of a Statistical Life. *Journal of Benefit-Cost Analysis* 8(2): 226-250. <https://doi.org/10.1017/bca.2017.12>

World Bank Group. (2022). The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution. A Case for Action Beyond 2021. *International Development Focus*. www.openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/36501/9781464818165.pdf?sequence=4&isAllowed=y

World Health Organization (WHO). (2013). WHO: Health Risks of Air Pollution in Europe-HRAPIE Project. http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/238956/Health_risks_air_pollution_HRAPIE_project.pdf?ua=1

World Health Organization (WHO). (2021). WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>

Yao, M., Wu, G., Zhao, X., & Zhang, J. (2020). Estimating health burden and economic loss attributable to short-term exposure to multiple air pollutants in China. *Environmental Research*, 183, 109184. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109184>

Zhang, Q., Zheng, Y., Tong, D., Shao, M., Wang, S., Zhang, Y., ... & Hao, J. (2019). Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(49), 24463-24469.

<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1907956116>

Zheng, X., Ding, H., Jiang, L., Chen, S., Zheng, J., et al. (2015). Association Between Air Pollutants and Asthma Emergency Room Visits and Hospital Admissions in Time Series Studies: a Systematic Review and Meta-analysis. *PLoS One*, 10(9):e0138146.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138146>

Zhou, Y., Levy, J. I., Hammitt, J. K., & Evans, J. S. (2003). Estimating population exposure to power plant emissions using CALPUFF: A case study in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 37(6), 815-826. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00937-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00937-8)