

Taranto-Lecce, 16 luglio 2024

Alla  
Procura della Repubblica  
presso il Tribunale di Taranto  
Sua Sede  
TARANTO

**OGGETTO: Esposto e denuncia sulla nocività all'ambiente e alla salute umana delle emissioni di CO<sub>2</sub> dell'installazione "ex Ilva", ai sensi degli artt. 35 e 37 della Carta dei diritti fondamentali dell'Unione europea (così come da applicare alla luce della Sentenza della Corte di Giustizia UE in causa C-626/22) e degli artt. 9 e 41 della Costituzione (così come da applicare alla luce della Sentenza della Corte costituzionale n. 105/2024).**

I sottoscritti **Michele Carducci** (documento di identità allegato) e **Alessandro Marescotti** (documento di identità allegato), rispettivamente Coordinatore del *Centro di Ricerca Euro Americano sulle Politiche Costituzionali* (Cedeuam) dell'Università del Salento ([www.cedeuam.it](http://www.cedeuam.it)) e Rappresentate legale dell'Associazione *PeaceLink* ([www.peacelink.it](http://www.peacelink.it)),

di seguito congiuntamente indicati come "Istanti",

#### **viste**

- la sentenza della Corte di giustizia UE resa nella causa C-626/22, nella parte in cui assume gli artt. 35 e 37 della Carta dei diritti fondamentali dell'Unione europea quali parametri della qualificazione della "nocività" delle emissioni dell'installazione "ex Ilva",
- la sentenza della Corte costituzionale italiana n. 105/2024, nella parte in cui declina l'obbligo di "non recare danno" all'ambiente e alla salute con il dovere di operare, per qualsiasi attività pubblica o privata, nell'interesse anche delle generazioni future,

#### **considerato**

- che la summenzionata sentenza della Corte di giustizia impone di considerare la "nocività" delle emissioni industriali dell'installazione "ex Ilva", alla luce delle acquisizioni scientifiche e non solo dei dati normativi formali,

#### **constatato**

- che, tra le emissioni industriali dell'installazione "ex Ilva", si annoverano ovviamente quelle di gas serra (CO<sub>2</sub> ed equivalenti),

#### **preso atto**

- che la scienza concorda, a livello internazionale, sulla nocività delle emissioni di CO<sub>2</sub> ed equivalenti, con la c.d. "*the 1000 ton-Rule*", che in pratica contabilizza le morti umane per milione di tonnellate di gas serra antropogenici emessi,

#### **tenuto conto**

- che la suddetta nocività è resa ancor più pericolosa, grave e mortifera nell'attuale, persistente situazione di emergenza climatica, dal Consiglio d'Europa definita di "triplice crisi planetaria" (cambiamento climatico con inquinamento e perdita di biodiversità), nella *Declaration of the Fourth Summit of Heads of State and Government of the Council of Europe* (Reykjavík, Iceland, 16-17 May 2023),
- che l'Italia ha aderito alla suddetta *Declaration* e non contesta né la situazione di emergenza climatica né la nocività delle emissioni di gas serra, come accertato in sede di Corte europea dei diritti dell'uomo, nei casi "*Duarte Agostinho et al.*" (Application no. [39371/20](#)), con l'Italia parte convenuta, e "*Verein KlimaSeniorinnen*" (Application no. [53600/20](#)), con l'Italia parte per intervento volontario,

#### **rilevato**

- che la nocività delle emissioni di CO<sub>2</sub> ed equivalenti colpisce sia la presente che le future generazioni, come accertato e dichiarato dalla Corte europea dei diritti dell'uomo, nel citato caso "*Verein KlimaSeniorinnen*", ponendosi dunque in violazione degli artt. 9 e 41 Cost., come da applicare ai sensi della sentenza della Corte costituzionale n. 105/2024,

#### **tutto ciò premesso come parte integrate del presente documento, gli Istanti**

reputano doveroso e necessario sottoporre all'attenzione della Procura un recente studio scientifico, riguardante l'impatto delle emissioni di CO<sub>2</sub> dell'installazione "ex Ilva" di Taranto, pubblicato sulla Rivista *Epidemiologia & Prevenzione* (anno 47 (nn. 4-5) luglio-ottobre 2023), intitolato «*Il "mortality cost" delle emissioni di CO<sub>2</sub> di uno stabilimento siderurgico nel Sud Italia: una valutazione degli impatti sanitari derivanti dal cambiamento climatico*».

Infatti, valga in merito quanto segue.

1)

Tale studio scientifico, che si allega, contiene verosimili e preoccupanti previsioni di decessi connessi alla CO<sub>2</sub> dello stabilimento siderurgico tarantino, tali da essere meritevoli di una doverosa segnalazione all'autorità giudiziaria.

2)

In sintesi, quello che lo studio scientifico accerta riguarda

- il pericolo per la salute pubblica non solo locale ma globale delle emissioni industriali climalteranti dell'installazione;
- la quantificazione del suddetto pericolo con una Valutazione di Impatto Sanitario.

3)

Pertanto, tale accertamento scientifico corrisponde

- ai requisiti di pericolosità delle emissioni, scientificamente accertabili, richiesti dalla sentenza della Corte di giustizia UE nella causa C-626/22;
- alla considerazione intergenerazionale dei danni all'ambiente e alla salute, richiesta dalla sentenza della Corte costituzionale n. 105/2024, in base ai riformati artt. 9 e 41 Cost.

4)

Infatti, lo studio stima che le emissioni di CO<sub>2</sub> dell'installazione "ex Ilva", sulla sola base dei dati emissivi del 2020 e considerando esclusivamente le ondate di calore, potrebbero causare

1876 decessi nel mondo entro il 2100, con l'aggravio che ogni anno di inazione aggiungerebbe ovviamente nuove vittime, moltiplicando il numero di decessi (per esempio, se l'installazione "ex Ilva" continuasse le sue emissioni del 2020 per altri 10 anni, i decessi stimati aumenterebbero a 18.760.

5)

Non è dato riscontrare confutazioni scientifiche al suddetto studio e ai suoi calcoli né contestazioni o richieste di rettifica o replica – da parte dei soggetti imprenditoriali interessati – nei confronti della testata scientifica che l'ha pubblicato.

6)

Si è, dunque, in presenza di un fatto non contestato dagli interessati e non confutabile dai protocolli scientifici, nei modi richiesti dall'art. 2697 Cod. civ.

7)

D'altra parte, che lo studio non sia scientificamente confutabile, deriva dal fatto che esso si basa su un modello di "*health impact assessment prospettico globale*" delle emissioni marginali di CO<sub>2</sub> equivalenti, dichiarate dall'installazione stessa "ex Ilva", per il 2020. Questo modello, denominato "*Mortality Cost of Carbon*" ed elaborato da Bressler,

- quantifica l'eccesso di morti attribuibili all'aumento delle temperature causato dalle emissioni di CO<sub>2</sub> di una determinata fonte
- in una proiezione che addirittura è di sottostima dell'impatto mortifero, non considerando, come accennato, tutti i processi dannosi attivati dalle emissioni antropogeniche di gas serra.

8)

Pertanto, si è in presenza del primo studio che considera l'impatto su scala mondiale delle emissioni dell'installazione "ex Ilva",

- non limitandosi alla popolazione di Taranto;
- non limitandosi al tempo presente ma nell'interesse anche delle generazioni future;
- nell'espressa sottostima della nocività accertata<sup>1</sup>.

### Conclusioni

I dati allarmanti di questo studio, coniugati con i parametri normativi di tutela della salute umana e dell'ambiente nell'emergenza climatica in atto, inducono a ipotizzare l'esistenza di un gravissimo reato di pericolo non solo locale e attuale, ma addirittura transfrontaliero e intergenerazionale.

Tale gravità è enfatizzata dal fatto che, per il rinnovo/riesame dell'Autorizzazione Integrata Ambientale,

- nulla di tale impatto di mortalità da carbonio risulta essere stato preso in considerazione;

---

<sup>1</sup> Lo studio sottostima gli impatti climatici in termini di mortalità, considerando solo gli effetti termici e non altri impatti significativi (inondazioni, diffusione di malattie infettive, scarsità di cibo, guerre ecc., cfr. p. 278). Inoltre, esso si basa su un modello di calcolo che considera uno scenario futuro non virtuoso (c.d. "scenario emissivo baseline"), ossia quello in cui gli Stati non adottano misure di riduzione delle emissioni di gas serra, compatibili con le soglie di pericolo, di cui all'art. 2 dell'Accordo di Parigi sul clima, del 2015. Tale scenario appare quello verosimile, dopo il c.d. "*Global Stocktake*" degli adempimenti climatici degli Stati, accertato come negativo e "fuori rotta" dalla COP28 di Dubai (cfr. UNFCCC, *Global Stocktake*, <https://unfccc.int/topics/global-stocktake>).

- addirittura si mira a triplicare la produzione di carbon coke e ad aumentare la produzione di acciaio, fino a 8 milioni di tonnellate/anno, come se le enormi ulteriori emissioni di CO<sub>2</sub> fossero inoffensive e non nocive<sup>2</sup>;
- nonostante l'indagine pendente su c.d. "falsi dati sulle quote CO<sub>2</sub>" (cfr. *La Gazzetta del Mezzogiorno*, 4 luglio 2024)

Sembrano, dunque, sussistere tutti gli elementi costitutivi del reato di pericolo, in termini soggettivi (data l'accessibilità pubblica, da parte dei responsabili dell'installazione "ex Ilva", dei dati sulla pericolosità delle emissioni di CO<sub>2</sub> come causa di morti presenti e future), oggettivi (data la non contestazione, da parte di chi di interesse, dei dati sulla mortalità da carbonio e la non confutabilità scientifica degli stessi), di bene giuridico da tutelare (presidiato dagli artt. 35 e 37 della Carta dei diritti fondamentali dell'UE e dai riformati artt. 9 e 41 Cost.), di indefettibile urgenza nell'intervenire (data l'emergenza climatica in atto, dagli stessi Stati riconosciuta e dichiarata).

Altrettanto **indiscutibile è il dato che le emissioni antropogeniche di CO<sub>2</sub> siano molto più pericolose di qualsiasi altra emissione industriale**, nella misura in cui concorrono ad **aggravare l'emergenza climatica, che non è un mero "disastro ambientale" bensì un "bad-to-worst" scenario, che proietta il nostro imminente futuro nel "Climate Endgame"**: la partita finale tra la nostra negligenza nella lotta alle emissioni antropogeniche di gas serra e lo stravolgimento catastrofico del sistema climatico (si v. in merito Kemp Luke et al., «*Finale di partita sul clima. Esplorare gli scenari catastrofici dei cambiamenti climatici*»).

In fede

Firmato

Prof. Michele Carducci



Prof. Alessandro Marescotti

**Si allegano:**

- a) Studio sulla mortalità da CO<sub>2</sub> dell'installazione "ex Ilva" («*Il "mortality cost" delle emissioni di CO<sub>2</sub> di uno stabilimento siderurgico nel Sud Italia: una valutazione degli impatti sanitari derivanti dal cambiamento climatico*»);
- b) Articolo scientifico sulla c.d. "1.000 ton Rule" della CO<sub>2</sub> («*Quantifying Global Greenhouse Gas Emissions in Human Deaths to Guide Energy Policy*»);

---

<sup>2</sup> Nonostante la notorietà del fatto che la cokeria dell'installazione "ex Ilva" Ilva rappresenti una delle principali fonti di emissioni dell'intero stabilimento siderurgico.

- c) Commento alla sentenza della Corte di Giustizia UE, datato 27 giugno 2024, a cura di Michele Carducci (*«L'installazione "ex Ilva" dopo la sentenza della Corte di giustizia UE: le emissioni climalteranti tra interesse "strategico" e generazioni future»*);
- d) Commento alla sentenza della Corte di Giustizia UE, datato 1 luglio 2024, a cura di Michele Carducci (*«La sentenza europea sull'ex Ilva mette fine alle "deroghe" all'italiana»*);
- e) Commento alla sentenza della Corte di Giustizia UE, datato 1 luglio 2024, a cura di Giorgio Trivi (*«Catalogo aperto delle emissioni pericolose e tutela della persona tra diritto interno ed europeo»*);
- f) Commento sui nessi tra emissioni, inquinamento e cambiamento climatico, datato 2 luglio 2024, a cura di Giorgio Trivi (*«Cambiamento climatico e inquinamento, alla luce di sei recenti decisioni giudiziali: l'analogia come analisi dei "co-benefici" della mitigazione climatica e attuazione del principio europeo di "integrazione"»*);
- g) Commento alla sentenza della Corte costituzionale n. 105/2024, a cura di Michele Carducci (*«Il duplice "mandato" ambientale tra costituzionalizzazione della preservazione intergenerazionale, neminem laedere preventivo e fattore tempo. Una prima lettura della sentenza della Corte costituzionale n. 105 del 13 giugno 2024»*);
- h) Articolo di Kemp Luke et al., *«Finale di partita sul clima. Esplorare gli scenari catastrofici dei cambiamenti climatici»*;
- i) Documento di identità di Michele Carducci;
- j) Documento di identità di Alessandro Marescotti.

## Il “mortality cost” delle emissioni di CO<sub>2</sub> di uno stabilimento siderurgico nel Sud Italia: una valutazione degli impatti sanitari derivanti dal cambiamento climatico

The mortality cost of carbon dioxide emissions from a steel plant in Southern Italy: a climate change health impact assessment

Orazio Valerio Giannico,<sup>1</sup> Simona Baldacci,<sup>2</sup> Lucia Bisceglia,<sup>3</sup> Sante Minerba,<sup>4</sup> Michele Conversano,<sup>2</sup> Antonia Mincuzzi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Struttura complessa di statistica ed epidemiologia, Azienda sanitaria locale di Taranto, Taranto, Italy

<sup>2</sup> Dipartimento di prevenzione, Azienda sanitaria locale di Taranto, Taranto, Italy

<sup>3</sup> Area epidemiologia e Care Intelligence, Agenzia regionale strategica per la salute e il sociale della Puglia, Bari, Italy

<sup>4</sup> Direzione sanitaria, Azienda sanitaria locale di Taranto, Taranto, Italy

**Corrispondenza:** Orazio Valerio Giannico; oraziovaleriogiannico@gmail.com

### Riassunto

**Obiettivi:** quantificare gli impatti sanitari mondiali, correlati alle variazioni di temperatura, delle emissioni di CO<sub>2</sub>e dello stabilimento siderurgico di Taranto.

**Disegno:** utilizzando le funzioni di rischio disponibili in letteratura, è stato condotto un *health impact assessment* prospettico globale delle emissioni marginali di CO<sub>2</sub>e dichiarate dall'acciaieria per il 2020.

**Setting e partecipanti:** popolazione mondiale nel periodo 2020-2100.

**Principali misure di outcome:** decessi nel periodo 2020-2100 attribuibili alla CO<sub>2</sub>e marginale emessa dall'acciaieria di Taranto nel 2020.

**Risultati:** considerando le stime centrali nello scenario emissivo *baseline* (aumento di 4,1 gradi entro il 2100), le emissioni di CO<sub>2</sub>e dello stabilimento siderurgico di Taranto del 2020 causeranno 1.876 decessi nel mondo fra il 2020 e il 2100. La quota maggiore sarà attribuibile ai processi siderurgici, con 1.093 decessi. Le stesse emissioni causeranno  $5,56 \times 10^{-4}$  decessi nel mondo fra il 2020 e il 2100 per tonnellata di acciaio prodotta nel 2020, ovvero un decesso ogni 1.799 tonnellate di acciaio. Se nel 2020 le emissioni di CO<sub>2</sub>e dello stabilimento siderurgico fossero state ridotte del 25%, del 50% o del 75%, le morti evitate nel mondo nel periodo 2020-2100 sarebbero state rispettivamente 469, 938 e 1.407.

**Conclusioni:** le stime prevedono un probabile importante impatto delle emissioni di gas serra dello stabilimento siderurgico di Taranto in termini di mortalità a livello mondiale entro la fine del secolo. La sola riduzione del 50% delle emissioni di un singolo anno permetterebbe forse di evitare oltre 900 morti in tutto il mondo entro la fine del secolo. Ciò conferma l'importanza di attuare incisive politiche di riduzione delle emissioni di gas serra in tutti i settori.

**Parole chiave:** cambiamento climatico, riscaldamento globale, CO<sub>2</sub>, gas serra, valutazione di impatto sanitario, industria siderurgica

### Abstract

**Objectives:** to quantify the temperature-related global health impacts of the Taranto steel plant CO<sub>2</sub>e emissions.

**Design:** using the risk functions available in the literature,

### Cosa si sapeva già

- Sebbene siano stati condotti e pubblicati numerosi studi e valutazioni in relazione agli impatti sanitari derivanti dall'esposizione a diversi inquinanti nella popolazione dell'area a rischio di Taranto, come suggerito dall'Unione europea sarebbe opportuno considerare anche il contributo dell'acciaieria al cambiamento climatico tramite le sue emissioni di CO<sub>2</sub>.
- Lo stabilimento siderurgico di Taranto è responsabile di una consistente quota di emissioni di gas serra, ponendosi fra i principali emettitori di CO<sub>2</sub>.

### Cosa si aggiunge di nuovo

- È stato condotto un *health impact assessment* prospettico globale per il periodo 2020-2100 delle emissioni marginali di CO<sub>2</sub>e dichiarate dall'acciaieria di Taranto per il 2020.
- Nello scenario emissivo *baseline*, si stima che le emissioni di CO<sub>2</sub>e dello stabilimento siderurgico di Taranto del 2020 causeranno 1.876 decessi nel mondo fra il 2020 e il 2100.
- La sola riduzione del 50% delle emissioni dell'acciaieria di Taranto di un singolo anno permetterebbe forse di evitare oltre 900 morti in tutto il mondo entro la fine del secolo.

a prospective global health impact assessment of the marginal CO<sub>2</sub>e emissions declared by the steel plant for 2020 was conducted.

**Setting and participants:** world population in the period 2020-2100.

**Main outcomes measures:** deaths in the period 2020-2100 attributable to the marginal CO<sub>2</sub>e emitted by the Taranto steel plant in 2020.

**Results:** considering the central estimates in the baseline emission scenario (4.1°C warming by 2100), the Taranto steel plant 2020 CO<sub>2</sub>e emissions will cause 1,876 deaths worldwide between 2020 and 2100. The largest part will be attributable to steelmaking processes, accounting for 1,093 deaths. The same emissions will cause  $5.56 \times 10^{-4}$  deaths worldwide between 2020 and 2100 per tonne of steel produced in 2020, i.e. one death for every 1,799 tonnes of steel. If the 2020 CO<sub>2</sub>e emissions of the steel plant had been reduced by 25%, 50% or 75%, the deaths avoided in the world in the period 2020-2100 would have been 469, 938 and 1,407 respectively.

## RASSEGNE E ARTICOLI

**Conclusions:** estimates predict a probably significant mortality impact worldwide by the end of the century associated with the greenhouse gases emissions of the Taranto steel plant. Just reducing emissions by 50% in a single year could maybe avoid over 900 deaths worldwide by the end of the century.

This confirms the importance of implementing incisive policies to reduce greenhouse gases emissions in all sectors.

**Keywords:** climate change, global warming, CO<sub>2</sub>, greenhouse gases, health impact assessment, steel industry

## Introduzione

Il cambiamento climatico, i cui effetti sono già visibili in tutto il pianeta, rappresenta probabilmente la più grande minaccia per la salute globale che l'umanità dovrà affrontare nei prossimi decenni, eppure spesso si fa fatica a percepire correttamente l'impatto sanitario di tale fenomeno.<sup>1-4</sup>

Per cambiamento climatico si intende una modificazione a lungo termine delle temperature e dei modelli meteorologici, mentre il riscaldamento globale è definito come il riscaldamento a lungo termine della superficie terrestre. A partire dal XIX secolo, le attività umane, e in particolare l'utilizzo di combustibili fossili come il carbone, il petrolio e il gas, sono state la principale causa di questi due fenomeni.<sup>5,6</sup>

Dall'inizio dell'era industriale, infatti, le attività umane hanno determinato un aumento della anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) atmosferica del 50%, il che significa che la quantità di questo gas è attualmente il 150% del suo valore nel 1750. La CO<sub>2</sub> è un gas che intrappola il calore, o gas serra (*greenhouse gas*, GHG). Questi gas, una volta emessi, possono permanere nell'atmosfera per un periodo variabile da pochi anni fino a migliaia di anni, abbastanza a lungo da diventare ben miscelati. Ciò significa la loro quantità misurata nell'atmosfera è più o meno la stessa in tutto il mondo, indipendentemente dalla fonte locale di emissione.<sup>7-9</sup>

Per quanto concerne l'aumento delle temperature, dal periodo preindustriale, si stima che le attività umane abbiano determinato un incremento della temperatura media globale della Terra di circa 1°C, un numero che attualmente sta aumentando di oltre 0,2°C per decennio. L'attuale tendenza al riscaldamento è inequivocabilmente il risultato dell'attività umana e sta procedendo a un ritmo senza precedenti nel corso dei millenni.<sup>5-7</sup>

In generale, gli effetti diretti e indiretti dei cambiamenti climatici sulla salute umana possono includere un aumento delle malattie respiratorie e cardiovascolari, lesioni e morti premature legate ad eventi meteorologici estremi, impatti sul sistema alimentare, cambiamenti nella prevalenza e nella distribuzione geografica di diverse malattie trasmissibili, alterazioni della qualità dell'aria ed effetti sul comportamento umano, sulla salute mentale e sull'erogazione di servizi sanitari e sociali, sulla sfe-

ra riproduttiva e sulla salute materno-fetale.<sup>1,2,4,10-13</sup> Focalizzando l'attenzione sugli effetti sulla salute umana mediati dal calore, l'aumento delle temperature e le ondate di calore, in buona parte attribuibili ai cambiamenti climatici, sono responsabili di un documentato eccesso di mortalità e morbilità a livello globale, con impatti che variano per età, sesso, grado di urbanizzazione e fattori socioeconomici.<sup>3,4,10,14,15</sup>

Le temperature elevate, definite come temperature medie giornaliere più alte della temperatura associata al minimo di mortalità per tutte le cause, sono state anche analizzate tra i fattori di rischio di livello 3 del *Global Burden of Diseases, Injuries, and Risk Factors Study* (GBD) 2019, che riporta una stima di 308.000 morti e 11,7 milioni di *disability-adjusted life years* (DALYs) per il 2019.<sup>16</sup>

In relazione a quanto sopra esposto, la disponibilità sempre maggiore di dati, evidenze e modelli riguardanti sia le ripercussioni delle emissioni di gas serra sul clima sia gli effetti di tali alterazioni climatiche sulla salute umana permette oggi di poter provare a stimare, seppure con dei margini di incertezza, gli impatti sanitari dei cambiamenti climatici.<sup>4,14,17-19</sup>

Fra i principali emettitori di GHG vi è l'industria siderurgica, che è responsabile del 7% delle emissioni di CO<sub>2</sub> nel mondo e del 5% in Europa.<sup>20</sup>

Lo stabilimento siderurgico di Taranto (Puglia, Sud Italia) è uno dei più grandi nel continente europeo ed è responsabile di una consistente quota di emissioni di gas serra, ponendosi fra i principali emettitori di CO<sub>2</sub>.<sup>21,22</sup>

Nello stesso territorio, dove è stato individuato un Sito di Interesse Nazionale (SIN), sono anche presenti una raffineria, un'area portuale e alcune discariche.<sup>23</sup>

Sebbene siano stati condotti e pubblicati numerosi studi e valutazioni in relazione agli impatti sanitari derivanti dall'esposizione a diversi inquinanti nella popolazione dell'area a rischio di Taranto<sup>23-26</sup>, come suggerito dall'Unione europea sarebbe opportuno considerare anche il contributo dell'acciaieria al cambiamento climatico tramite le sue emissioni di CO<sub>2</sub>.<sup>27</sup>

Scopo di questo studio è, dunque, provare a quantificare gli impatti sanitari, correlati alle variazioni di temperatura, determinati dalle emissioni di CO<sub>2</sub> dello stabilimento siderurgico di Taranto.

## Materiali e metodi

### Emissioni di CO<sub>2</sub> e mortalità

Per le valutazioni di impatto sanitario delle emissioni dell'acciaieria è stato utilizzato il *Mortality Cost of Carbon* (MCC) del 2020 calcolato da Bressler<sup>19</sup> per il periodo 2020-2100, che quantifica (stima centrale, <10° e >90° percentile) i decessi in eccesso in tutto il mondo nel periodo 2020-2100 attribuibili all'aumento delle temperature causato da ogni tonnellata aggiuntiva (marginale) di CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) emessa nel 2020.

In pratica sono morti premature attribuibili al cambiamento climatico che si verificano, in tutto il mondo ed entro fine secolo, in eccesso rispetto ad uno scenario controfattuale in cui l'emissione di CO<sub>2</sub>e marginale non si è verificata.<sup>19</sup>

L'MCC(2020) è stato, dunque, stimato da Bressler<sup>19</sup> secondo la seguente equazione:

$$MCC(2020) = \sum_{t=2020}^{t=2100} \frac{\partial \delta(T_t)}{\partial T_t} \frac{\partial T_t}{\partial E_{2020}} L_t d_t$$

$T_t$  ed  $E_{2020}$  rappresentano rispettivamente la temperatura media globale nel periodo  $t$  e le emissioni di CO<sub>2</sub>e nel 2020.

$\partial \delta(T_t) / \partial T_t$  rappresenta l'effetto marginale di un leggero aumento delle temperature globali medie sulla mortalità, ovvero la derivata prima della *mortality damage function*  $\delta(T_t)$ .

$\partial T_t / \partial E_{2020}$  rappresenta l'effetto marginale delle emissioni del 2020 sulle temperature globali medie ed è determinato dal modello climatico.

$L_t$  e  $d_t$  rappresentano rispettivamente la popolazione umana globale e il tasso di mortalità nel periodo  $t$ . La funzione di mortalità  $\delta(T_t)$ , che tiene conto anche delle azioni di adattamento difensivo ai cambiamenti climatici, è stata stimata da Bressler conducendo una *quantitative systematic research synthesis* della letteratura scientifica riguardante gli effetti del cambiamento climatico (nello specifico, gli effetti dell'aumento delle temperature) sulla mortalità e riportando, oltre alla stima centrale, anche la sua incertezza (<10° e >90° percentile).<sup>19</sup>

Tale funzione, di forma quadratica, appare convessa rispetto alla temperatura, ovvero  $\partial \delta(T_t) / \partial T_t$  aumenta all'aumentare della temperatura.<sup>19</sup>

Per tenere conto delle eventuali azioni di mitigazione dei cambiamenti climatici a livello mondiale, tale stima è stata condotta da Bressler<sup>19</sup> nell'ambito di due scenari emissivi globali, quello *baseline* (aumento di 4,1 °C entro il 2100, rispetto all'epoca pre-industriale) e quello "ottimale" (aumento di 2,4 °C entro il 2100, rispetto all'epoca pre-industriale).

Nello scenario emissivo *baseline* (aumento di 4,1 °C

entro il 2100), l'MCC(2020) unitario è pari a 2,26 (-1,71; 6,78) × 10<sup>-4</sup> morti fra il 2020 e il 2100 per tonnellata di CO<sub>2</sub>e emessa nel 2020.<sup>19</sup>

Nello scenario emissivo ottimale (aumento di 2,4 °C entro il 2100), l'MCC(2020) unitario è pari a 1,07 (-2,16; 5,22) × 10<sup>-4</sup> morti fra il 2020 e il 2100 per tonnellata di CO<sub>2</sub>e emessa nel 2020.<sup>19</sup>

Questo vuol dire che, nello scenario *baseline* e utilizzando la stima centrale, la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>e di un milione di tonnellate nel 2020 avrebbe permesso di evitare 226 morti nel periodo 2020-2100. Un milione di tonnellate di CO<sub>2</sub>e corrispondono all'incirca alle emissioni annuali medie di 35 aerei di linea commerciali, 216.000 autovetture e 115.000 abitazioni negli Stati Uniti. Questo valore dell'MCC(2020) unitario implica anche che le emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 di una centrale elettrica a carbone di media grandezza negli Stati Uniti saranno responsabili di 904 morti stimate nel periodo 2020-2100.<sup>19</sup>

Secondo lo studio di Bressler,<sup>19</sup> lo scenario emissivo "ottimale" sarebbe quello che determinerebbe un aumento delle temperature di "soli" 2,4 °C entro il 2100. In tale scenario si eviterebbero infatti, in larga parte, le temperature in cui gli aumenti marginali della temperatura derivanti da un'emissione marginale odierna sarebbero più dannosi per la salute umana. Tuttavia, per il suo raggiungimento, secondo il modello di Bressler<sup>19</sup> sarebbero necessarie riduzioni grandi e immediate delle emissioni di CO<sub>2</sub>e, fino ad una completa decarbonizzazione entro il 2050.

In sintesi, il valore dell'MCC(2020) dipende dalla scenario climatico globale, il quale a sua volta è determinato dalla politica climatica presente e futura.<sup>19</sup>

In ogni caso, fissando uno scenario emissivo globale, l'MCC(2020) unitario, che è una stima degli impatti marginali ed è costante per quello specifico scenario, può essere utilizzato per le valutazioni di impatto delle emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 derivanti dalle attività di individui, famiglie, aziende e altre organizzazioni. Tali emissioni, infatti, possono essere considerate marginali rispetto alle emissioni aggregate mondiali conteggiate dalla rivoluzione industriale fino alla fine del ventunesimo secolo.<sup>19</sup>

Per ulteriori dettagli sulla metodologia di stima dell'MCC(2020) e sul suo utilizzo si rimanda al lavoro di Bressler.<sup>19</sup>

### Valutazione di impatto sanitario delle emissioni di CO<sub>2</sub> dell'acciaieria di Taranto

L'MCC(2020) delle emissioni dell'acciaieria è stato, dunque, calcolato moltiplicando l'MCC(2020) unitario (stima centrale, <10° e >90° percentile, in entrambi gli scenari di riscaldamento globale,<sup>19</sup> per le emissioni di CO<sub>2</sub>e (tonnellate di CO<sub>2</sub>e) dichiarate dell'acciaieria per il 2020,

## RASSEGNE E ARTICOLI

sia totali che disaggregate per fonte di emissione.<sup>22,28</sup> Le emissioni di CO<sub>2</sub>e sono quelle calcolate e dichiarate dall'acciaiera relativamente all'anno di esercizio 2020 e sono consultabili anche sulla pagina web dello *Union Registry* della Commissione Europea.<sup>22,28</sup>

Nel dettaglio, le emissioni dichiarate possono essere divise fra processo produttivo (*scope 1*), produzione di energia da parte delle due centrali termoelettriche (*scope 1*) ed emissioni indirette derivanti dall'energia acquistata (*scope 2, location based*).<sup>22,28</sup>

Le emissioni di GHG *scope 1* sono quelle dirette derivanti da fonti controllate o di proprietà dello stabilimento (combustione di gas, forni etc.). Le emissioni di GHG *scope 2*, invece, sono quelle indirette derivanti dall'acquisto o acquisizione di energia (elettricità, calore, vapore etc.). Per le emissioni *scope 2* è stata utilizzata la metodologia *location based*, che considera l'intensità media delle emissioni di CO<sub>2</sub>e delle reti sulle quali si verifica il consumo di energia, utilizzando principalmente i dati relativi al fattore di emissione medio della rete.<sup>28,29</sup>

Per ulteriori dettagli sulla metodologia di stima delle emissioni di CO<sub>2</sub>e, si rimanda al documento di ADI.<sup>28</sup> Successivamente, moltiplicando l'MCC(2020) unitario<sup>19</sup> per la *carbon intensity* (CI) (tonnellate di CO<sub>2</sub>e/tonnellata di acciaio prodotta) del 2020 dichiarata dall'acciaiera per il 2020,<sup>28</sup> è stata calcolata una nuova misura, il *Mortality Cost of the Carbon Intensity* dell'Acciaiera (MCCI) del 2020 per il periodo 2020-2100, che rappresenta il costo globale in morti fra il 2020 e il 2100 per tonnellata di acciaio prodotta nel 2020.

Infine, si sono prese in considerazione tre ipotesi di riduzione e tre di incremento delle emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 dell'acciaiera rispettivamente del 25%, 50% e 75% e sono state calcolate le morti evitate - o causate - nel mondo fra il 2020 e il 2100 se si fossero ridotte - o incrementate - le emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 dello stabilimento siderurgico rispettivamente di quelle percentuali.

## Risultati

In Tabella 1 sono riportati le emissioni di CO<sub>2</sub>e dichiarate per il 2020<sup>22,28</sup> e il MCC(2020) (numero di decessi attribuibili) stimato per il periodo 2020-2100 dello stabilimento siderurgico di Taranto.

Per il 2020 l'acciaiera ha dichiarato l'emissione (*Scope 1 + 2 location based*) di 8.299.668 tonnellate di CO<sub>2</sub>e (t CO<sub>2</sub>e). La quota maggiore è attribuibile ai processi siderurgici, con 4.834.123 t CO<sub>2</sub>e, seguita dalla produzione di energia, con 3.442.085 t CO<sub>2</sub>e.

Nello scenario emissivo *baseline* (aumento di 4,1 gradi entro il 2100), le stime prevedono che le emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto causeranno 1.876 (-1.419; 5.627) decessi nel

mondo fra il 2020 e il 2100. La quota maggiore sarà attribuibile ai processi siderurgici, con 1.093 (-827; 3.278) decessi, seguita dalla produzione di energia, con 778 (-589; 2.334) decessi.

Nello scenario emissivo ottimale (aumento di 2,4 gradi entro il 2100), le stime prevedono che le emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto causeranno 888 (-1.793; 4.332) decessi nel mondo fra il 2020 e il 2100. La quota maggiore sarà attribuibile ai processi siderurgici, con 517 (-1.044; 2.523) decessi, seguita dalla produzione di energia, con 368 (-743; 1.797) decessi.

In Tabella 2 sono riportate la CI(2020) (tonnellate di CO<sub>2</sub>e/tonnellata di acciaio prodotta) dichiarata per il 2020<sup>28</sup> e il MCCI(2020) (numero di decessi attribuibili/tonnellata di acciaio prodotta) stimato per il periodo 2020-2100 dello stabilimento siderurgico di Taranto.

Per il 2020 l'acciaiera ha dichiarato una CI(2020) di 2,46 t CO<sub>2</sub>e emesse nel 2020 per tonnellata di acciaio prodotta nel 2020.

Nello scenario emissivo *baseline*, le stime prevedono che le emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto causeranno 5,56 (-4,21; 16,68) × 10<sup>-4</sup> decessi nel mondo fra il 2020 e il 2100 per tonnellata di acciaio prodotta nel 2020, ovvero un decesso ogni 1.799 tonnellate di acciaio (stima centrale). Nello scenario emissivo ottimale, le stime prevedono che le emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto causeranno 2,63 (-5,31; 12,84) × 10<sup>-4</sup> decessi nel mondo fra il 2020 e il 2100 per tonnellata di acciaio prodotta nel 2020, ovvero sia un decesso ogni 3.799 tonnellate di acciaio (stima centrale).

Di seguito sono riportati i risultati delle valutazioni relative a tre ipotesi di riduzione e tre ipotesi di incremento delle emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto in termini di variazione del MCC(2020) dell'acciaiera (stima centrale, per entrambi gli scenari climatici) per il periodo 2020-2100.

Nello scenario emissivo *baseline*, le stime prevedono che, se le emissioni del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto fossero state ridotte del 25%, del 50% o del 75%, le morti evitate nel mondo fra il 2020 e il 2100 sarebbero state rispettivamente 469, 938 e 1.407.

Nello scenario emissivo ottimale, le stime prevedono che, se le emissioni del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto fossero state ridotte del 25%, del 50% o del 75%, le morti evitate nel mondo fra il 2020 e il 2100 sarebbero state rispettivamente 222, 444 e 666. Nello scenario emissivo *baseline*, le stime prevedono che, se le emissioni del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto fossero state incrementate del 25%, del 50% o del 75%, le morti causate nel mondo

**RASSEGNE E ARTICOLI**

Emissioni globali di GHG (2020-2100)	Emissioni locali di GHG (2020)		Costo globale (2020-2100) delle emissioni locali di GHG		
	Fonte di emissione	t CO <sub>2</sub> e	MCC (decessi attribuibili)		
			Low mortality estimate (<10 <sup>th</sup> p.)	Central mortality estimate	High mortality estimate (>90 <sup>th</sup> p.)
Scenario emissivo <i>baseline</i> (riscaldamento di 4,1 °C entro il 2100)	Stabilimento siderurgico	8.299.668	-1.419	1.876	5.627
	Processi siderurgici	4.834.123	-827	1.093	3.278
	Produzione di energia	3.442.085	-589	778	2.334
	Energia acquistata o acquisita	23.460	-4	5	16
Scenario emissivo <i>ottimale</i> (riscaldamento di 2,4 °C entro il 2100)	Stabilimento siderurgico	8.299.668	-1.793	888	4.332
	Processi siderurgici	4.834.123	-1.044	517	2.523
	Produzione di energia	3.442.085	-743	368	1.797
	Energia acquistata o acquisita	23.460	-5	3	12

CO<sub>2</sub>e: carbon dioxide equivalent/anidride carbonica equivalente; GHG: greenhouse gases/gas serra; MCC: mortality cost of carbon/costo del carbonio in termini di mortalità; p: percentile/percentile; t: metric ton/tonnellata metrica.

**Tabella 1.** MCC globale nel periodo 2020-2100 derivante dalle emissioni del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto.

**Table 1.** Global MCC in the period 2020-2100 deriving from the 2020 emissions of the Taranto steel plant.

Emissioni globali di GHG (2020-2100)	Emissioni locali di GHG (2020)		Costo globale (2020-2100) delle emissioni locali di GHG		
	Fonte di emissione	CI (t CO <sub>2</sub> e / t di acciaio prodotta)	MCCI (decessi attribuibili / t di acciaio prodotta)		
			Low mortality estimate (<10 <sup>th</sup> p.)	Central mortality estimate	High mortality estimate (>90 <sup>th</sup> p.)
Scenario emissivo <i>baseline</i> (riscaldamento di 4,1 °C entro il 2100)	Stabilimento siderurgico	2,46	-4,21 × 10 <sup>-4</sup>	5,56 × 10 <sup>-4</sup>	16,68 × 10 <sup>-4</sup>
Scenario emissivo <i>ottimale</i> (riscaldamento di 2,4 °C entro il 2100)	Stabilimento siderurgico	2,46	-5,31 × 10 <sup>-4</sup>	2,63 × 10 <sup>-4</sup>	12,84 × 10 <sup>-4</sup>

CI: carbon intensity/intensità carbonica; CO<sub>2</sub>e: carbon dioxide equivalent/anidride carbonica equivalente; GHG: greenhouse gases/gas serra; MCCI: mortality cost of the carbon intensity/costo dell'intensità carbonica in termini di mortalità; p: percentile/percentile; t: metric ton/tonnellata metrica.

**Tabella 2.** MCCI globale nel periodo 2020-2100 derivante dalle emissioni del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto.

**Table 2.** Global MCCI in the period 2020-2100 deriving from the 2020 emissions of the Taranto steel plant.

fra il 2020 e il 2100, da aggiungere a quelle già stimate sulle emissioni dichiarate, sarebbero state rispettivamente 469, 938 e 1.407.

Nello scenario emissivo ottimale, le stime prevedono che, se le emissioni del 2020 dello stabilimento siderurgico di Taranto fossero state incrementate del 25%, del 50% o del 75%, le morti causate nel mondo fra il 2020 e il 2100, da aggiungere a quelle già stimate sulle emissioni dichiarate, sarebbero state rispettivamente 222, 444 e 666.

## Discussione

Le stime del presente studio prevedono un probabile importante impatto delle emissioni di gas serra dello stabilimento siderurgico di Taranto in termini di mortalità a livello mondiale entro la fine del seco-

lo, in accordo con le evidenze scientifiche internazionali che attribuiscono chiaramente ai cambiamenti climatici indotti dall'uomo importanti impatti di sanità pubblica presenti e futuri.<sup>1-4</sup>

Facendo riferimento solo alle stime centrali, nell'ambito dello scenario emissivo *baseline* la sola riduzione del 50% delle emissioni di un singolo anno dello stabilimento siderurgico di Taranto avrebbe forse permesso di evitare oltre 900 morti in tutto il mondo entro la fine del secolo. Questo eccesso di mortalità globale si aggiunge, peraltro, ai già ben documentati e noti impatti sulla salute della popolazione locale.<sup>23-26</sup>

Per esempio, la valutazione di Galise et al.<sup>25</sup> sugli impatti delle emissioni di PM<sub>2.5</sub> dell'acciaieria di Taranto ha stimato, per lo scenario emissivo 2015, un numero di decessi attribuibili annuali pari a 5 nei tre comuni di Taranto, Statte e Massafra.

## RASSEGNE E ARTICOLI

Se si prendono in considerazione, in generale, tutte le tipologie di emissioni di CO<sub>2</sub>e e si fa riferimento all'inventario delle emissioni europee,<sup>30</sup> il 77% delle emissioni di GHG è legato alla produzione di energia, l'11% all'agricoltura, il 9% ai processi industriali e il 3% al trattamento dei rifiuti.

Applicando, con finalità di confronto, la stessa metodologia (stima centrale, scenario *baseline*) alle emissioni stimate annuali degli abitanti (emissioni pro-capite del 2020 moltiplicate per la popolazione residente del 2020)<sup>31,32</sup> della Regione Puglia (18.580.534 t CO<sub>2</sub>e) e della Provincia di Taranto (2.650.777 t CO<sub>2</sub>e), si ottengono rispettivamente 4.199 e 599 decessi nel mondo nel periodo 2020-2100 attribuibili alle emissioni di CO<sub>2</sub>e del 2020 della popolazione residente.

Ciò conferma l'importanza, in un'ottica di sanità pubblica, di implementare incisive politiche di riduzione delle emissioni di GHG in tutti i settori, non solo quello industriale.

A tal proposito, sarebbe altresì utile applicare questa metodologia di stima degli impatti sanitari del cambiamento climatico anche ad altre realtà industriali presenti nel territorio di Taranto. In particolare, sarebbe interessante estendere il presente studio alla raffineria situata vicino allo stabilimento siderurgico, tenendo conto non solo delle emissioni di CO<sub>2</sub>e scope 1 o 2, ma anche di quelle derivanti dall'utilizzo, in qualsiasi parte del mondo, dei combustibili fossili prodotti dalla raffineria stessa (scope 3).

I vantaggi dell'approccio suggerito da Bressler 2021<sup>19</sup> e qui ripreso in un ambito locale sono essenzialmente i seguenti:

1. la metodologia è facilmente applicabile e riproducibile;<sup>19</sup>
2. l'MCC(2020) rappresenta un indicatore semplice e trasparente dell'impatto delle emissioni di GHG, a differenza delle stime degli impatti del cambiamento climatico in termini di costo economico della CO<sub>2</sub>e emessa (e dei decessi), che invece dipendono largamente dalla scelta a priori della metodologia e sollevano interrogativi di natura etica in merito alla "valutazione economica" della vita umana;<sup>19</sup>
3. la funzione di mortalità utilizzata da Bressler per stimare il MCC(2020) tiene conto anche degli effetti dell'adattamento difensivo attuato al fine di ridurre gli impatti del cambiamento climatico in termini di mortalità.<sup>19</sup>
4. l'MCC(2020) tiene conto anche degli effetti delle azioni di mitigazione dei cambiamenti climatici a livello mondiale, in quanto le stime sono state condotte nell'ambito di due scenari globali, *baseline* e ottimale, che rappresentano in qualche modo gli estremi di un *continuum* di possibili futuri scenari emissivi e climatici.<sup>19</sup>

Lo studio presenta d'altro canto importanti limitazioni, che sono sostanzialmente le stesse del lavoro di Bressler:<sup>19</sup>

1. le stime centrali degli impatti sono accompagnate da ampi margini di incertezza che includono anche l'ipotesi di non-effetto;<sup>19</sup>
2. le stime non tengono conto dei co-benefici degli interventi di riduzione delle emissioni di GHG, per esempio la riduzione delle emissioni di particolato atmosferico;<sup>19,25,33</sup>
3. la stima tiene conto solo degli effetti legati all'aumento delle temperature, non considerando altri *climate-mortality pathways* come quelli relativi ai cambiamenti della distribuzione di diverse malattie infettive, alle guerre, alla scarsità di cibo e alle inondazioni.<sup>1,4,19,34</sup>

La prima limitazione potrebbe causare una sovrastima oppure una sottostima degli impatti delle emissioni di CO<sub>2</sub>e sulla mortalità, la seconda e la terza invece potrebbero determinarne verosimilmente una sottostima.<sup>19</sup>

In relazione alla prima limitazione, è probabile che ulteriori dati, ricerche e studi permetteranno nel prossimo futuro di stimare con sempre maggiore accuratezza gli impatti sulla salute umana dei cambiamenti climatici.

D'altro canto, occorre anche tenere presente che tali margini di incertezza si riferiscono principalmente alla quantificazione della funzione che lega l'incremento della temperatura alla mortalità a livello globale. A prescindere da tale quantificazione numerica, infatti, in letteratura non vi sono praticamente dubbi ormai sulla direzione di tale relazione, ovverosia sul fatto che i cambiamenti climatici e il riscaldamento globale determinano e determineranno impatti negativi sulla salute umana in tutto il mondo.<sup>1-4,10,14,35-37</sup> Un aumento futuro della mortalità correlata al caldo è infatti considerato come uno degli impatti più probabili del cambiamento climatico di origine antropica, mediato sia dagli aumenti delle temperature medie stagionali sia da un aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore.<sup>4,14,36,37</sup>

Tali impatti sono già visibili. In Europa, per esempio, nel 2003 sono stati osservati circa 70.000 decessi attribuibili alle ondate di calore. Sempre in Europa, sono stati registrati consistenti aumenti delle temperature, addirittura pari al doppio della media globale degli ultimi 30 anni: le temperature nel continente europeo sono infatti aumentate di 0,5°C per decade dal 1990 al 2021. Come ulteriore conseguenza, i ghiacciai alpini hanno perso ben 30 metri di spessore di ghiaccio dal 1997 al 2021; similmente, la calotta glaciale della Groenlandia si sta sciogliendo, contribuendo ad accelerare l'innalzamento del livello del mare.<sup>10,35</sup>

## RASSEGNE E ARTICOLI

Per quanto riguarda la seconda limitazione, qualsiasi sia il settore di intervento, bisogna appunto considerare da un punto di vista di sanità pubblica anche i benefici per la salute umana derivanti dalla riduzione contemporanea dell'esposizione ad altri inquinanti, come, per esempio il particolato atmosferico, associata alle politiche di riduzione delle emissioni di gas serra.<sup>19,25,33</sup>

In tale ottica non bisogna inoltre dimenticare, oltre ai guadagni in termini di vite umane salvate a seguito di una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>e, anche i benefici sociali, sanitari ed economici che deriverebbero dalla mitigazione dei cambiamenti climatici. Si fa riferimento, per esempio, alla prevenzione dei costi sociali, sanitari ed economici derivanti dall'aumento delle patologie correlate al caldo (come quelli legati all'assistenza sanitaria) o dall'attuazione delle strategie di adattamento difensivo (come quelli legati all'utilizzo massivo degli impianti di condizionamento dell'aria).<sup>4,10,19</sup>

Infine, in relazione all'ultima limitazione, è importante ricordare che il cambiamento climatico esercita degli effetti sulla salute umana anche non direttamente correlati all'aumento delle temperature (malattie infettive, guerre, malnutrizione, inondazioni etc.).<sup>1,4,19,34</sup>

Sarebbe auspicabile dunque, in futuro, proseguire gli studi e aggiornare le valutazioni sanitarie del presente lavoro, sia utilizzando, quando saranno disponibili, funzioni di rischio accompagnate da una minor incertezza, sia prendendo in considerazione, nel processo di *assessment*, anche gli elementi di cui alle ultime due limitazioni.

In sostanza, la valutazione degli effetti del cambiamento climatico sulla salute umana e, di conseguenza, la programmazione delle azioni volte alla mitigazione e all'adattamento obbligano a riflessioni che non riguardano unicamente la sfera locale, in quanto gli effetti dell'aumento dei gas serra si manifestano su tutto il pianeta e coinvolgono tutta l'umanità, risultando spesso più evidenti in contesti di maggiore vulnerabilità della popolazione.<sup>4</sup>

Come accennato in precedenza, ciò che conta per l'impatto (correlato all'aumento delle temperature) delle emissioni marginali di CO<sub>2</sub>e non è tanto il nu-

mero aggregato di decessi, ma la derivata prima della *mortality damage curve*, ovvero quanti decessi in eccesso derivano da un aumento incrementale delle temperature derivante da un aumento incrementale delle emissioni del 2020. Infatti, quando le temperature medie globali superano i 2 °C, la derivata prima diventa piuttosto "ripida" e lo diventa sempre di più man mano che le temperature continuano ad aumentare.<sup>19</sup>

Tali evidenze dovrebbero costituire per tutti un forte incentivo a voler assolutamente evitare quegli scenari emissivi e climatici in cui le temperature medie globali determineranno verosimilmente gli impatti più significativi in termini di mortalità.<sup>19</sup>

A tal proposito, anche se le stime quantitative di questo studio riguardano unicamente l'effetto marginale delle emissioni di un singolo anno dell'acciaieria, non bisogna dimenticare che tali emissioni comunque contribuiscono, nel corso degli anni e insieme a tutte le altre emissioni mondiali, alla definizione dello scenario globale.

Pertanto, la riduzione di tali emissioni locali non solo avrebbe di per sé effetti positivi relativamente al danno marginale stimato dall'MCC(2020) nel presente studio, ma potrebbe contribuire, soprattutto se duratura e se attuata insieme alla riduzione delle altre emissioni a livello mondiale, a influenzare positivamente anche lo scenario emissivo globale.

Si rende pertanto necessaria l'adozione di una nuova prospettiva, che tenga conto degli effetti delle attività umane, siano esse industriali o legate all'approvvigionamento energetico, ai trasporti o all'agricoltura, non soltanto sulle aree geografiche circostanti, ma su tutto il pianeta.

In conclusione, pur tenendo conto dei limiti di cui sopra, in particolare della significativa incertezza delle stime, questo studio rappresenta un importante tentativo di quantificazione degli impatti sanitari globali di un'installazione locale mediata dal cambiamento climatico, che, utilizzando una metodologia facilmente riproducibile, prova a stimare i decessi attribuibili ad una determinata quantità di emissioni annuali di gas serra.

**Conflitti di interesse dichiarati:** nessuno.

## Bibliografia

- World Health Organization. Climate Change and Health. 2021a. Disponibile all'indirizzo: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- Centers for Disease Control and Prevention. Climate Effects on Health. 2022a. Disponibile all'indirizzo: <https://www.cdc.gov/climateandhealth/effects/default.htm#:~:text=The%20health%20effects%20of%20these,and%20threats%20to%20mental%20health> (Ultimo accesso: 27.12.2022).
- Centers for Disease Control and Prevention. Climate Effects on Health - Temperature Extremes. 2022b. Disponibile all'indirizzo: [https://www.cdc.gov/climateandhealth/effects/temperature\\_extremes.htm](https://www.cdc.gov/climateandhealth/effects/temperature_extremes.htm) (Ultimo accesso: 24.01.2023).
- Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. Disponibile all'indirizzo: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- United Nations. Climate Action. What Is Climate Change? 2023. Disponibile all'indirizzo: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change> (Ultimo accesso: 24.01.2023).
- National Aeronautics and Space Administration. Global Warming vs. Climate Change. 2023a. Disponibile all'indirizzo: <https://climate.nasa.gov/global-warming-vs-climate-change/> (Ultimo accesso: 24.01.2023).
- United States Environmental Protection Agency. Basics of Climate Change 2022a. Disponibile all'indirizzo: <https://www.epa.gov/climatechange-science/basics-climate-change> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- United States Environmental Protection Agency. Overview of Greenhouse Gases. 2022b. Disponibile all'indirizzo: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#CO2-references> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- National Aeronautics and Space Administration. Vital Signs. Carbon Dioxide. 2023b. Disponibile all'indirizzo: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- World Health Organization. Heat and Health. 2018. Disponibile all'indirizzo: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- Poursafa P, Keikha M, Kelishadi R. Systematic review on adverse birth outcomes of climate change. *J Res Med Sci* 2015;20(4):397-402.
- Kuehn L, McCormick S. Heat Exposure and Maternal Health in the Face of Climate Change. *Int J Environ Res Public Health* 2017;14(8):853.
- Canelón SP, Boland MR. A Systematic Literature Review of Factors Affecting the Timing of Menarche: The Potential for Climate Change to Impact Women's Health. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(5):1703.
- World Health Organization. Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. 2014. Disponibile all'indirizzo: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/134014> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- He C, Ma L, Zhou L et al. Exploring the mechanisms of heat wave vulnerability at the urban scale based on the application of big data and artificial societies. *Environ Int* 2019;127:573-83.
- GBD 2019 Diseases and Injuries Collaborators. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. High temperature - Level 3 risk. *Lancet* 2020; 396(10258):s238-39. Disponibile all'indirizzo: <https://www.thelancet.com/pb-assets/Lancet/gbd/summaries/risks/high-temperature.pdf> (Ultimo accesso: 24.01.2023).
- Gasparrini A, Guo Y, Sera F et al. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet Health* 2017;1(9):e360-e367.
- Carleton T, Jina A, Delgado M et al. Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits. Working Paper 27599, 2020;115. Disponibile all'indirizzo: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3665869#](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3665869#) (Ultimo accesso: 15.01.2023).
- Bressler RD. The mortality cost of carbon. *Nat Commun* 2021;12(1):4467.
- European Commission. EU climate targets: how to decarbonise the steel industry. 2022. Disponibile all'indirizzo: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15\\_en#\\_ftn1](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15_en#_ftn1) (Ultimo accesso: 31.01.2023).
- European Commission. Environment: European Commission urges Italy to address severe pollution issues at Europe's biggest steel plant. 2014. Disponibile all'indirizzo: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_14\\_1151](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_14_1151) (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- European Commission. Union Registry. Verified emissions for 2020. 2021. Disponibile all'indirizzo: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/union-registry\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/union-registry_en) (Ultimo accesso: 16.11.2022).
- Zona A, Iavarone I, Buzzoni C, et al. 2019. Studio epidemiologico nazionale dei territori e degli insediamenti esposti a rischio da inquinamento. Quinto Rapporto [SENTIERI: Epidemiological Study of Residents in National Priority Contaminated Sites. Fifth Report]. *Epidemiol Prev* 2019 Mar-Jun;43(2-3 Suppl 1):1-208. Italian. Erratum in: *Epidemiol Prev* 2019 Jul-Aug;43(4):219.
- Alessandrini ER, Leogrande S, Morabito A, et al. Studio di coorte sugli effetti delle esposizioni ambientali ed occupazionali sulla morbosità e mortalità della popolazione residente a Taranto. 2016. Disponibile all'indirizzo: <https://www.sanita.puglia.it/documents/890301/896208/Relazione+Finale+Studio+di+Coor+e+2016/ea231c81-e196-4b43-99a4-0882bd60b83b> (Ultimo accesso: 25.01.2023).
- Galise I, Serinelli M, Morabito A et al. L'impatto ambientale e sanitario delle emissioni dell'impianto siderurgico di Taranto e della centrale termoelettrica di Brindisi. *Epidemiol Prev* 2019;43(5-6):329-37.
- Leogrande S, Alessandrini ER, Stafoggia M et al. Industrial air pollution and mortality in the Taranto area, Southern Italy: A difference-in-differences approach. *Environ Int* 2019;132:105030.
- European Parliament. The ILVA Industrial Site in Taranto. In-Depth Analysis. Directorate General For Internal Policies. Policy Department A: Economic And Scientific Policy. 2015. Disponibile all'indirizzo: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2015/563471/IPOL\\_IDA\(2015\)563471\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2015/563471/IPOL_IDA(2015)563471_EN.pdf) (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- Acciaierie d'Italia. Rapporto di sostenibilità. Esercizio 2021. Stabilimento di Taranto. 2022. Disponibile all'indirizzo: <https://www.acciaierieditalia.com/it/insight/bilancio-sostenibilita-stabilimento-Taranto/> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- United States Environmental Protection Agency. Scope 1 and Scope 2 Inventory Guidance. 2022c. Disponibile all'indirizzo: <https://www.epa.gov/climateleadership/scope-1-and-scope-2-inventory-guidance> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- European Parliament. Emissioni di gas serra nell'UE per paese e settore: Infografica. 2021. Disponibile all'indirizzo: [https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180301ST098928/20180301ST098928\\_it.pdf](https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2018/3/story/20180301ST098928/20180301ST098928_it.pdf) (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- Istituto Nazionale di Statistica. Popolazione residente per sesso, età e stato civile al 1° gennaio 2020. Disponibile all'indirizzo: <https://demo.istat.it/app/?i=POS&l=it> (Ultimo accesso: 17.01.2023).
- The World Bank. CO<sub>2</sub> emissions (metric tons per capita). 2023. Disponibile all'indirizzo: [https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?name\\_desc=false](https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?name_desc=false) (Ultimo accesso: 23.08.2023).
- World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021b. Disponibile all'indirizzo: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329> (Ultimo accesso: 21.05.2023).
- European Centre for Disease Prevention and Control. Climate change and communicable diseases in the EU Member States. Handbook for national vulnerability, impact and adaptation assessments. 2010. Disponibile all'indirizzo: [https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/media/en/publications/Publications/1003\\_TED\\_handbook\\_climatechange.pdf](https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/media/en/publications/Publications/1003_TED_handbook_climatechange.pdf) (Ultimo accesso: 24.01.2023).
- World Meteorological Organization. Temperatures in Europe increase more than twice global average. 2022. Disponibile all'indirizzo: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/temperatures-europe-increase-more-twice-global-average#:~:text=Temperatures%20over%20Europe%20have%20warmed,to%20accelerating%20sea%20level%20rise> (Ultimo accesso: 24.01.2023).
- Smith K, Woodward A, Campbell-Lendrum D et al. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In: Field CB, Barros V, Dokken D, editors. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Vol I: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 2014.
- Huang C, Barnett AG, Wang X, Vaneckova P, Fitzgerald G, Tong S. Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios: a systematic review. *Environ Health Perspect* 2011;119(12):1681-90.

Review

# Quantifying Global Greenhouse Gas Emissions in Human Deaths to Guide Energy Policy

Joshua M. Pearce <sup>1,\*</sup>  and Richard Parncutt <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical & Computer Engineering and Ivey School of Business, Western University, London, ON N6G 0N1, Canada

<sup>2</sup> University of Graz, 8010 Graz, Austria; richard.parncutt@uni-graz.at

\* Correspondence: joshua.pearce@uwo.ca

**Abstract:** When attempting to quantify future harms caused by carbon emissions and to set appropriate energy policies, it has been argued that the most important metric is the number of human deaths caused by climate change. Several studies have attempted to overcome the uncertainties associated with such forecasting. In this article, approaches to estimating future human death tolls from climate change relevant at any scale or location are compared and synthesized, and implications for energy policy are considered. Several studies are consistent with the “1000-ton rule,” according to which a future person is killed every time 1000 tons of fossil carbon are burned (order-of-magnitude estimate). If warming reaches or exceeds 2 °C this century, mainly richer humans will be responsible for killing roughly 1 billion mainly poorer humans through anthropogenic global warming, which is comparable with involuntary or negligent manslaughter. On this basis, relatively aggressive energy policies are summarized that would enable immediate and substantive decreases in carbon emissions. The limitations to such calculations are outlined and future work is recommended to accelerate the decarbonization of the global economy while minimizing the number of sacrificed human lives.

**Keywords:** carbon emissions; greenhouse gas emissions; global catastrophic risk; climate change; energy policy; human mortality; climate genocide



**Citation:** Pearce, J.M.; Parncutt, R. Quantifying Global Greenhouse Gas Emissions in Human Deaths to Guide Energy Policy. *Energies* **2023**, *16*, 6074. <https://doi.org/10.3390/en16166074>

Academic Editor: Adel Ben Youssef

Received: 26 July 2023

Revised: 9 August 2023

Accepted: 17 August 2023

Published: 19 August 2023



**Copyright:** © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Despite repeated and ever more serious warnings [1] from the scientific community, global greenhouse gas (GHG) emissions and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentrations in the atmosphere continue to increase as fossil fuel combustion increases [2]. It is now established with 95% confidence that anthropogenic global climate destabilization is occurring [3,4] and has potentially irreversible negative repercussions for global environment and the social and economic welfare of humanity [5,6]. Yet, despite these well-known facts, there has been a reluctance to apply aggressive energy policies to eliminate fossil fuel combustion. The reasons are both political (involving conflicting interests) and psychological (involving abstractions that may not be directly perceptible).

Climate change causes human deaths in diverse ways, which can be divided into direct, intermediate, indirect, and their interactions. Direct mortal effects of climate change include heat waves, which have already caused thousands of human deaths [7–9] by a combination of heat and humidity (wet-bulb temperature > 35 °C, such that the human body is physically unable to cool itself with perspiration). Intermediate causes of death (between direct and indirect) involve crop failures, droughts, flooding, extreme weather, wildfires, and rising seas. Crop failures [10,11] can exacerbate existing socially-constructed global hunger and starvation resulting in tens of thousands of human deaths [12–14]. More frequent or severe droughts [15–17] can lead to more frequent or severe wildfires [18–20] that also cause human deaths. Droughts lead to contaminated water, diseases, and deaths

from dehydration [21,22]. The 2022 IPCC Report (6th Assessment Report) predicted that drought would displace 700 million people in Africa by 2030 [23]. Climate change can cause flooding and consequent destruction of property and crops, which also drives hunger and disease [24]. Climate change drives sea level rise and the resultant submersion of low-lying coastal areas and shoreline erosion [25,26], saltwater intrusion [26,27], storm damage to coastlines, and exacerbated flood risks [18,28–30]. These dangers are life-threatening for billions of people in coastal cities who face the prospect of forced migration [31]. Climate change increases extreme weather events (e.g., hurricanes), which indirectly kill and cause damage worth billions of dollars [32–34]. Extreme weather events kill in many ways including, for example, electric grid failures and power outages [35,36] that reduce access to electric-powered medical care. Indirectly, climate change increases the probability of conflict [37–41]. As the number of climate refugees increases [42–44], countries further from the equator might increasingly refuse to offer asylum. In a worst-case scenario, social collapse is possible [45,46].

For humanity, the most important consequence of climate change will be human deaths. The value of human life may be considered the foundation of all human values, as reflected by the universal legal importance of crimes such as murder, manslaughter, and genocide [47]. Therefore, when attempting to quantify the future harms caused by carbon emissions, the number of human deaths caused by climate change may be the most important metric. Philosopher John Nolt explained [48]:

*Climate change will cause large numbers of casualties, perhaps extending over thousands of years. Casualties have a clear moral significance that economic and other technical measures of harm tend to mask. They are, moreover, universally understood, whereas other measures of harm are not. Therefore, the harms of climate change should regularly be expressed in terms of casualties by such agencies such as IPCC's Working Group III, in addition to whatever other measures are used. Casualty estimates should, furthermore, be used to derive estimates of casualties per emission source up to a given date. Such estimates would have wide margins of error, but they would add substantially to humanity's grasp of the moral costs of particular greenhouse gas emissions.*

“Casualties” can be deaths, injuries, or illness. In the medical literature these complexities are normally dealt with using the disability-adjusted life year (DALY), which is a measure of overall disease burden, expressed as the number of years lost due to ill-health, disability or early death [49,50]. DALYs have been found to be a useful tool for quantifying human damage from environmental pollution [51]. Since the World Bank first published the DALY concept in 1993, the use of life expectancy estimates, disability weights, age weighting, and discounting has evolved [52]. Unfortunately, as researchers in many fields have adjusted the equations used for estimating the DALY and have increasingly challenged assumptions underlying these calculations, comparing DALY estimates across different studies has become difficult. More concerning are studies that argue that the conceptual and technical basis for DALYs is flawed, its assumptions and value judgments are questionable as well as implications of age-weighting and discounting [53–55]. The stakes are high for the assumptions that underly a DALY because it is often used for cost-effectiveness analysis, which is used for funding allocations [56]. Rather than attempt to resolve that debate, and in agreement with Nolt [48], this review will focus only on human deaths caused by climate change, because they are more easily defined and categorically more serious than injuries or illnesses. In future scenarios of interest, death tolls are also likely to correlate with rates of injury and illness, making each of the three values an approximate measure or predictor of the other. This review aims to provide a clear guide for energy policy makers, which have historically not fully considered the ramifications of AGW on human deaths.

In the following text, published approaches to quantifying climate change in terms of human death tolls will first be summarized. After that, and on that basis, recommendations will be made for energy policy which are intended to be approximately applicable at every scale and in every geographic location.

## 2. Approaches to Quantifying Carbon Emissions with Human Deaths

### 2.1. The 1000-ton Rule

The 1000-ton rule says that a future person is killed every time humanity burns 1000 tons of fossil carbon. It is derived from a simple calculation: burning a trillion tons of fossil carbon will cause 2 °C of anthropogenic global warming (AGW) [57,58], which in turn will cause roughly a billion future premature deaths spread over a period of very roughly one century [59]. On the assumption that 2 °C of warming is either already inevitable (given the enormous political and economic difficulties of achieving a lower limit) or intended (given that the business plans of big fossil fuel industries make it inevitable), it can be concluded that burning 1000 tons of fossil carbon causes one future premature death.

The numbers “one billion” (for the total death toll at 2 °C) and “one thousand” (for the amount of carbon that needs to be burned to cause one death) are both very approximate (both are hardly more than order-of-magnitude estimates), but also consistent with diverse evidence and arguments:

- Before 2022, humans burned roughly 0.6 trillion tons of fossil carbon, causing a global temperature increase of roughly 1.2 °C. Incidentally, about the same amount of carbon is currently part of living things on this planet (550 billion T) [60].
- The carbon budget for 2 °C of AGW is about one trillion tons [61]. Thus, if humanity burns that amount altogether, the global mean surface temperature will rise by 2 °C. A more exact estimate is not necessary, because predicted death tolls will inevitably be even more approximate.
- About five trillion tons of fossil carbon are available in the Earth’s crust. If humanity collectively burned all of that, global mean surface temperature would increase by up to 10 °C relative to the pre-industrial era [57,58] and could threaten human extinction [62].
- Dividing one trillion by one billion, one thousand tons is the amount of carbon that needs to be burned today to cause a future premature death in the future: 1000 tons.

It has been clear for a decade or more [63] that the final death toll due to AGW will be much greater than 100 million, or one million per year for a century—an extreme best case if current death rates from AGW miraculously remained constant at about one million per year (a level that may have already have reached). Conversely, the final death toll in a 2 °C warming scenario will certainly be much less than 10 billion, which is the predicted global human population in 2100 in the absence of AGW [64]. Although climate change clearly represents a global catastrophic risk to food supplies [65], only a small minority are suggesting that 2 °C of warming could cause human extinction [66]. Warming of well over 2 °C, however, could indeed cause natural climate feedbacks to get out of control, leading eventually to human extinction [66]. Between these extreme boundaries, it is likely more than 300 million (“likely best case”) and less than 3 billion (“likely worst case”) will die as a result of AGW of 2 °C. That prediction is consistent with detailed predictions of climate science summarized by the World Health Organization and their probable consequences for human mortality [67].

### 2.2. Convergent Evidence for the 1000-ton Rule

Although AGW is a global concern, some studies have looked specifically at a single country’s emissions (USA) to illustrate the methods used. The 1000-ton rule is roughly consistent with two such independent studies from different academic disciplines—philosophy and economics. The authors of those studies arrived at their estimates of future death tolls by different methods but came to similar conclusions. First, an American philosopher John Nolt [68] concluded that the carbon emissions of the average American are causing the death or suffering of one or two future people. That is because the average American, in the course of a lifetime, causes (by her or his personal choices or participation in regular social structures) 1840 metric tons of CO<sub>2</sub> equivalent to be emitted. This corresponds to about 500 tons of carbon, so according to the 1000-tonne rule, those emissions are enough to kill half of a future person.

A more recent attempt at quantifying future deaths in connection with specific amounts of carbon was published by Bressler [69]. Coining an economically oriented term “mortality cost of carbon”, he claimed that “for every 4434 metric tons of CO<sub>2</sub> pumped into the atmosphere beyond the 2020 rate of emissions, one person globally will die prematurely from the increased temperature” [70]. His predictions were confined to deaths from extreme heat when wet-bulb temperature exceeds skin temperature (35 °C). He acknowledged the importance of other causes of death in connection with AGW such as “infectious disease, civil and interstate war, food supply, and flooding”, but considered them difficult to quantify—although taken together they may cause more deaths than direct heat. His estimate is consistent with the 1000-tonne rule, according to which one future person dies (for one of many reasons linked to AGW) whenever roughly 3700 tons of CO<sub>2</sub> are emitted.

### 2.3. The Temperature Niche

Xu and colleagues [71] have argued that “accounting for population growth projected in the SSP3 scenario, each degree of temperature rise above the current baseline roughly corresponds to one billion humans left outside the temperature niche, absent migration”. That is consistent with the 1000-ton rule if it is assumed that long-term survival outside the ecological niche is unlikely. Specifically, for every additional degree of warming beyond 2 °C, roughly an additional billion deaths will be caused, leading to human extinction at very roughly 10 °C of warming [59]. At 2 °C of warming, roughly 2 billion people would find themselves outside the climate niche as defined by Lenton et al. [72]. If it is assumed that global warming will be the ultimate cause of death for half of those people (e.g., due to the inability to migrate), then 2 °C of warming will cause a billion deaths.

Ecologist George Evelyn Hutchinson has shown that a species faces extinction if it leaves its ecological niche [73], but that does not apply to humans with access to energy reserves. Humans without access to the capital to provide for those energy reserves, however, will die, particularly if limited resources from climate change result in ‘climate wars’ [74].

### 2.4. Marginal Carbon Emissions-Related Deaths

The estimates made in Sections 2.1–2.3 are very rough but provide a useful rule of thumb for gaging a first approximation. The 1000-ton rule makes it clear that there is a marginal human death cost to every amount of warming, no matter how small. Thus, every 0.1 °C degree of warming can be expected to cause 100 million deaths. Similarly, every 0.001 °C of warming will cause a million deaths. If humanity misses the 2 °C target or any of the more granular goals to stop ‘dangerous climate change’ [75], which appears likely according to AI models [76], rather than relax and accept it, all efforts to reduce carbon emissions can be viewed as lifesaving.

## 3. Results: Carbon-Related Deaths to Guide Energy Policy

### 3.1. Large Numbers and the Millilife

Understanding the large variability in the number of human deaths from climate change requires an accessible unit of measure for carbon footprints that is easy to understand and may be used to set energy policy to help accelerate carbon emissions reductions. Using the “1000-tonne rule” as a basis it is possible to convert any carbon footprint to human lives. A *millilife* is defined as a measure of intrinsic value that is equivalent to one thousandth of the value of human life. A millilife is roughly the same as a month in the richest countries, assuming a lifespan of about 80 years, but it is closer to half a month in the poorest countries, in which the lifespan is closer to 40 years.

The 1000-ton rule says that a millilife is destroyed when a ton of fossil carbon is burned. For example in Canada, which has some of the highest yearly carbon emissions per capita in the world at around 19 tons of CO<sub>2</sub> or 5 tons of carbon per person [77], roughly 5 millilives are sacrificed by an average person each year. As the average Canadian lives

to be about 80, he/she sacrifices about 400 millilives (0.4 human lives) in the course of his/her lifetime, in exchange for a carbon-intensive lifestyle. Canada is one of the world's largest economies, currently ranked 9th [78]. Whereas the average gross domestic product globally is US\$12,183/person, Canada generates US\$51,988/person, more than 4 times the global average [78]. Canadians are thus not only wealthy by global standards but many already live outside of the human temperature niche. Climate change will likely benefit the Canadian economy in some sectors (e.g., agriculture and tourism), causing GDP to increase by up to 0.3% (\$9 billion/year) [79]. Even if some areas prosper, however, others will face major challenges that could cause great economic harm (e.g., increased forest fires [80]). By contrast, the Global South will suffer the most negative impacts of climate change [81–83].

Parncutt assumed [59] for the purpose of the 1000-ton rule that an average future AGW-victim in a developing country will lose half of a lifetime or 30–40 life-years, as most victims will be either very young or very old. If the average climate victim loses 35 life-years (or 13,000 life-days), a millilife corresponds to 13 days. Stated in another way: if a person is responsible for burning a ton of fossil carbon by flying to another continent and back, they effectively steal 13 days from the life of a future poor person living in the developing world. If the traveler takes 1000 such trips, they are responsible for the death of a future person.

This concept can also be applied to large-scale energy decisions. For example, the Adani Carmichael coalmine in Queensland, Australia, is currently under construction and producing coal since 2021. Despite massive protests over several years, it will be the biggest coalmine ever. Its reserves are up to 4 billion tons of coal, or 3 billion tons of carbon. If all of that was burned, the 1000-tonne rule says it would cause the premature deaths of 3 million future people. Given that the 1000-tonne rule is only an order-of-magnitude estimate, the number of caused deaths will lie between one million and 10 million. Currently, 10 million tons of coal are being mined per year [84], equivalent to 7.5 million tons of carbon or 7500 sacrificed human lives. Many of those who will die are already living as children in the Global South; burning Carmichael coal will cause their future deaths with a high probability. Should energy policy allow that to occur?

### 3.2. Quantifiable Metrics Warranting Industry-Wide 'Corporate Death Penalties'

Many authors have considered the benefits of a "corporate death penalty" (judicial dissolution of a corporation by the government) for reigning in companies that do harm [85–90]. Pearce considered quantitative criteria for industry-wide penalties of that kind in the case of non-carbon air pollution deaths from the U.S. coal mining industry [91]. The USA consumed about 546 million tons of coal in 2021 [92], corresponding to about 400,000 future deaths according to the 1000-tonne rule (as the worst lignite is only 65% carbon whereas the best anthracite is 92% and these are short tons, which are about 900 kg, but the 1000-ton rule originally applies to metric tons (tonnes) which are 1000 kg).

Under what circumstances might a government ban or outlaw an entire corporation or industry, considered a legal entity or person—for example, the entire global coal industry? The Universal Declaration of Human Rights [93] suggests how this question might be answered:

1. Everyone has the right to life (Article 3) [93]. The right to life is the primary right, as it is necessary to be alive to enjoy any other right such as the right to work.
2. Everyone has the right to work (Article 23) [93]. Corporations promote this right if they offer employment.
3. Corporations are human inventions, created by law to benefit humanity. The law should only give corporations the right to exist if they are beneficial to humanity. In the simplest case, a corporation can be viewed as 'good' if it creates profit and jobs (benefiting humans), but not if the operation of the business infringes the universal human right to life.

Ideally, a company should not cause any human deaths at all. If it does, those deaths should be justifiable in terms of improvements to the quality of life of others. For example, a company that builds a bridge might reasonably risk a future collapse that would kill 100 people with a probability of 1%. In that case, the company accepts that on average one future person will be killed as a result of the construction of the bridge. It may be reasonable to claim that the improved quality of life for thousands or millions of people who cross the bridge justifies the human cost.

Fossil fuel industries are causing far more future deaths than that, raising the question of the point at which the law should intervene. As a first step to solving this problem, it has been proposed a rather high threshold (generous toward the corporations) is appropriate. A company does not have the right to exist if its net impact on human life (e.g., a company/industry might make products that save lives like medicine but do kill a small fraction of users) is such that it kills more people than it employs. This requirement for a company's existence is thus:

$$\text{Number of future premature deaths/year} < \text{Number of full-time employees} \quad (1)$$

This criterion can be applied to an entire industry. If the industry kills more people than it employs, then primary rights (life) are being sacrificed for secondary rights (jobs or profits) and the net benefit to humankind is negative. If an industry is not able to satisfy Equation (1), it should be closed down by the government.

Coal is primarily burned for electrical generation. Coal-fired power plants pollute the air with a combination of greenhouse gases (carbon dioxide and methane) [94], particulate matter, nitrogen and sulfur oxides, and heavy metals such as mercury [95–97]. The resultant poor air quality causes mortality and morbidity effects on respiratory, cardiovascular, urinary, nervous, and digestive systems [98–101]. In this way, the coal industry kills people by polluting the air that they breathe [102,103]. Fossil fuel-related air pollution was responsible for 10.2 million excess deaths globally in 2012 (due to PM2.5 from this source) with 62% of deaths in China (3.9 million) and India (2.5 million) [104]. In the U.S., about 52,000 human lives are sacrificed per year to provide coal-fired electricity [105]. Such death rates can be estimated from meteorological models that analyze emissions and pollutant concentrations. Concentration-response functions allow researchers to estimate the number of deaths that could be avoided if combustion emissions from coal were eliminated [105].

In the U.S., coal employed 51,795 people in 2016. Since the number of people killed is greater than the number employed, the U.S. coal industry does not satisfy Equation (1) and should be closed down [91]. This conservative conclusion does not include future deaths caused by climate change due to burning coal [106–108].

## 4. Discussion

### 4.1. Causation and Attribution

As the number of deaths from coal-related air pollution is quantified in epidemiological studies [105] the question arises: Why is coal still burned in the USA although 52,000 Americans die from coal-related air pollution (excluding carbon) each year? A possible answer involves attribution. It is challenging to establish a causal connection between a given coal plant and the death of a specific future person. To overcome this challenge, instead, the 1000-ton rule assigns responsibility in proportion to the amount of carbon burned. If a company burns twice as much carbon as another, it kills twice as many future people. That is, the marginal death rate from future effects of global warming that are attributable to burning coal is twice as high. The 1000-ton rule makes that proportionality specific. If the total number of deaths from climate change is known and the carbon emissions are known, the attribution is pro-rated in the same way as climate liability [109].

Clearly, if a billion people are going to die prematurely due to AGW, those deaths should be prevented. If that question were asked to people from all walks of life and to leaders of diverse countries, the answer would surely always be the same. There is

also universal agreement that preventing deaths is better than regretting them afterward. Consequently, there should be universal agreement that humanity must *immediately* stop the killing of every individual future person, by *immediately* stopping the burning of every individual kiloton of carbon.

Those still profiting from emitting carbon might reasonably object that the chain of cause and effect between a carbon polluter's action and a future resultant death is complex. How can polluters be sure that they are the cause of a given future death? A similar legal question might be asked of a gunman who points a gun at a victim and pulls the trigger with the intention of killing the victim. The attempt may fail for a range of reasons, some of which are beyond the gunman's control: the gun might be faulty or not loaded, the gunman might miss the target, the target might suddenly move, the target might be injured but not killed, or the police may suddenly arrive, causing the gunman to flee. The gunman is nevertheless guilty of murder or manslaughter if two conditions are satisfied: the intent to kill can be demonstrated, and the victim dies as a result of the murder attempt. Similarly, fossil fuel industry leaders know in advance from media reports (even without reading this article, or other relevant academic literature) that their emissions will probably kill future people. That is true even if they do not intend to kill those people but are merely being negligent while maximizing their profits while providing a public service in the energy marketplace. Again, in that case, the chain of cause and effect is complex and can be interrupted in ways that are beyond the control of the industry. The industry's leadership is nevertheless guilty if it can be demonstrated that they were informed in advance about the deadly consequences of their actions or might reasonably have deduced those consequences themselves on the basis of publicly available information.

#### 4.2. Energy Policy Implications

Several energy policy implications immediately fall from adopting a 1000-ton rule of analysis. The primary goal should be to decrease carbon emissions to zero. Anything that causes emissions should be eliminated. A first baby step toward that goal might be to ban advertising for fossil fuels, just as advertisements for tobacco and cigarettes are banned [110]. In general, advertising should be banned if it encourages deadly habits (such as flying) and addictions (given the similarities between fossil-fuel use and addiction), in particular when the advertising is deliberately misleading (such as greenwashing). Likewise, consumers should be warned about the consequences of excessive or preventable fossil fuel use. For example, airline flight tickets could have a warning label: "Whereas smoking a cigarette takes 10 min off your life, an intercontinental return flight takes 13 days off the life of a future person". Better still, the number of lost days for the specific flight in question could be calculated.

That raises another interesting issue. Whoever willfully causes 1000 tons of carbon to be burned, knowing the consequences in advance but doing it all the same, is guilty of killing a future person. Since it can be presumed there is no motive or intent to kill, this is not murder in a legal sense. If the polluter causes future deaths, they are guilty of manslaughter. Thus, measuring carbon emissions in human lives not only makes the numbers easier to understand—it also clarifies what the priorities should be on the policy front, as allowing a policy to cause manslaughter is intuitively unacceptable. One approach to rectifying this problem involves carbon emission liability [109,111–114]. Emissions bottlenecks have been recommended as liability targets to strategically reduce the greatest amounts of carbon emissions [115].

Another interesting approach could be applying asset forfeiture laws [116] (also referred to as asset seizure) to manslaughter caused by AGW. These laws enable the confiscation of assets by the U.S. government as a type of criminal-justice financial obligation that applies to the proceeds of crime. Essentially, if criminals profit from the results of unlawful activity, the profits (assets) are confiscated by the authorities. This is not only a law in the U.S. but is in place throughout the world. For example, in Canada, Part XII.2 of the Criminal Code, provides a national forfeiture régime for property arising from the commission of

indictable offenses [117]. Similarly, ‘Son of Sam laws’ could also apply to carbon emissions. In the U.S., Son of Sam laws refer to laws designed to keep criminals from profiting from the notoriety of their crimes and often authorize the state to seize funds earned by the criminals to be used to compensate the criminal’s victims [118]. If that logic of asset forfeiture is applied to fossil fuel company investors who profit from carbon-emission-related manslaughter, taxes could be set on fossil fuel profits, dividends, and capital gains at 100% and the resultant tax revenue could be used for energy efficiency and renewable energy projects or to help shield the poor from the most severe impacts of AGW. Future work is needed to determine over what time period should such laws be in force (e.g., seizure of past profits) and if additional penalties are necessary if companies purposefully misled the public to continue to profit from manslaughter (e.g., Exxon-Mobil’s climate communication [119]). These laws would also apply to equipment manufacturers that enable fossil fuel extraction (e.g., pipeline equipment manufacturers). Such AGW-focused asset forfeiture laws would also apply to fossil fuel company executive compensation packages. Energy policy research has shown that it is possible to align energy executive compensation with careful calibration of incentive equations such that the harmful effects of emissions can be prevented through incentive pay [120]. Executives who were compensated without these safeguards in place would have their incomes seized the same as other criminals benefiting materially from manslaughter.

Energy policy designed specifically to mitigate climate change should be prioritized in the following three main areas [121]. In each area, the overriding need to save human lives justifies a reduction in fossil fuel burning that is both large and fast:

1. **Energy conservation:** Improved energy efficiency and the rational use of energy should be supported by government programs. This can include industrial [122], agricultural [123], transportation [124,125], sustainable cities [126], residential [127] and at the household level [128] energy efficiency in the developed world as well as the developing world [129]. Energy efficiency, however, is not enough to bring emissions to acceptable levels [130].
2. **Evolution of the energy mix:** Complete replacement of high carbon fuels (coal, oil and natural gas) by zero carbon content fuels (i.e., hydrogen, electricity, etc.) from renewable energy sources [131–133] like hydropower, wind, geothermal [134], biomass and most importantly solar, which can be scaled to provide a sustainable society [135]. It should be pointed out that renewable energy sources also can have adverse impacts on the local environment and should be minimized. Distributed generation (DG) with renewable energy should be encouraged as much as possible because many studies have shown DG customers provide a net benefit not only to non-DG customers but also to the overall electrical grid [136,137]. The value of solar studies [138] has confirmed that economic benefits surpass net metering rates and increasing the compensation for individuals investing in a renewable energy transition can be increased to at least meet this value. A broad range of policy tools have been introduced in countries and jurisdictions throughout the world that include [139]: tradable emission rights, tax credits, and subsidies, as well as regulations such as feed-in-tariffs for renewable energy production.
3. **Carbon waste management:** Development of techniques to devalue carbon-intensive fuel such as carbon taxes [140–142], and technical means for the capture and storage of CO<sub>2</sub> such as soil carbon sequestration [143].

The results of this study indicate more aggressive policies may be needed than the gradual decarbonization of the past: (i) instead of gradually increasing carbon taxes, ban the extraction of all fossil fuels [144], (ii) revoke the charters of fossil fuel companies and disperse their assets [91], (iii) retrain fossil-fuel workers en masse for renewable energy jobs [145], (iv) undercut fossil fuel regimes by giving renewable energy technologies to their citizens [146], (v) promote open-source technologies to erode the economies of fossil-fuel regimes [147], (vi) instead of complicated and time consuming rebates for energy conservation [148], make mass purchases of energy conservation or renewable energy technologies,

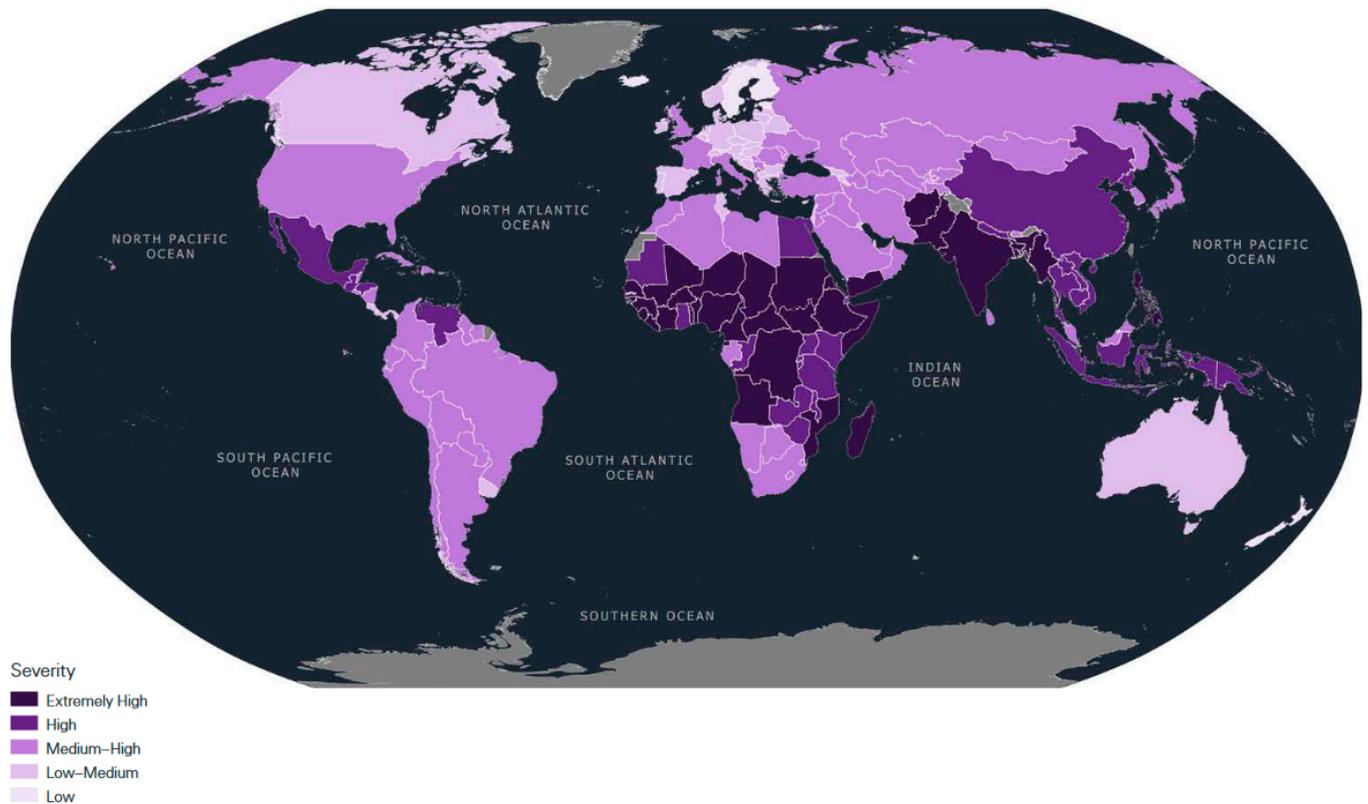
and make them freely available to all citizens (e.g., nationalizing/buying/constructing/subsidizing insulation plants or provide free insulation to everyone that will take it), (vii) ban the sale of fossil fuel vehicles [149] or even ban all cars [150], (viii) instead of incentivizing heat pumps [151], ban natural gas stoves [152] or even boilers [153], (ix) only allow development of net zero buildings (or better yet—positive energy buildings [154]), (x) as profiting from manslaughter is illegal, tax all fossil fuel-related investments at 100%, or (xi) hold climate emitters as well as investors economically liable for harm caused by carbon emissions in the future [109].

Some of these energy policies may appear extreme in historical context. Expressing carbon emissions in human lives clarifies the argument. For example, an outright ban on mining coal would negatively impact coal workers as they would lose their jobs and coal investors, as they would lose their money. As there are both alternative sources of energy and alternative jobs, the cost and inconvenience of retraining coal workers for other types of employment and cutting unearned income for coal investors who have ignored decades of scientific warnings pales in comparison to the need to protect millions of human lives.

#### 4.3. Limitations

Valerie Masson-Delmotte and colleagues warned humanity about the difference between 1.5 °C and 2 °C of warming [155]. On that basis, AGW of 2 °C was predicted to cause a billion premature deaths, spread across the next century or so. That raises the question of whether the number “one billion” is a reasonable estimate, or is it too high or too low? From a mathematical perspective, the number “one billion” is the peak of a rather broad probability distribution, within which the true value will fall—the number of people who actually die prematurely due to 2 °C of AGW. The distribution is assumed to be log-normal: normal (bell-shaped) and symmetrically relative to the logarithmic horizontal axis. The predicted number of deaths from 2 °C of warming can be broken down in various ways:

- Year: At present, the yearly death rate due to AGW is probably roughly one million. This figure is hard to estimate because AGW kills indirectly in diverse ways. The death rate was probably 300,000 per year in 2009 [156], and has been increasing steadily since then. In 2010, the Madrid thinktank DARA estimated that AGW would cause one million human deaths per year by 2030 [157]. At some point in the future, the death rate from various effects of AGW will overtake the number dying from air pollution—an independent negative effect of burning fossil fuels. Currently, some 7 million people are dying yearly from air pollution (either indoor or outdoor) [158]. Altogether, hundreds of millions will die in the coming decades as a result of fossil fuel burning, many of whom are already alive now. Further, hundreds of millions of future AGW victims have not yet been born.
- Age: Victims will die at any age, but they will be predominately (very) young or (very) old at the time of death, those two groups being more vulnerable [159,160].
- Location: UNICEF recently introduced the Children’s Climate Risk Index as shown in Figure 1 [145,148]. The death rate relative to the population will be higher in climate-vulnerable countries such as Afghanistan, Bangladesh, Barbados, Bhutan, Costa Rica, Ethiopia, Ghana, Kenya, Kiribati, Madagascar, Maldives, Nepal, Philippines, Rwanda, Saint Lucia, Tanzania, Timor-Leste, Tuvalu, Vanuatu, and Vietnam.
- Proximal cause: The deaths will be caused only indirectly by AGW. More direct causes of death will include heat and humidity, rising sea levels, freak storms, changing precipitation patterns, disappearing glaciers affecting water supplies, ocean acidification, more frequent bushfires, loss of biodiversity, and so on. Many of these side-effects of AGW will reduce food supplies, causing famines.



**Figure 1.** The Children's Climate Risk Index (CCRI) map of severity [161].

In August 2021, UNICEF warned that over one billion children are at extreme risk of the impacts of AGW [161]. According to the Children's Climate Risk Index (CCRI) [161],

- 240 million children are exposed to coastal flooding;
- 330 million to riverine flooding;
- 400 million to cyclones;
- 600 million to vector borne diseases;
- 815 million to lead pollution;
- 820 million to heatwaves;
- 920 million to water scarcity and
- one billion children to dangerously high levels of air pollution.

Looking at the problem from different perspectives provides convergent evidence for an estimate of 1 billion deaths at 2 °C of warming:

- The estimate corresponds to 10% of the projected future world population. All 10 billion humans will need food and fresh water to survive, and AGW will seriously affect both.
- Since CO<sub>2</sub> stays in the atmosphere for about a century, the prediction implies that, on average, 10 million additional deaths per year will be due to AGW.
- If the wet-bulb temperature exceeds skin temperature, perspiration can no longer cool the body. Already in 2022, this effect was life-threatening for a billion people in India and Pakistan [162]. In the same countries in 2023, maximum temperatures were consistently above 40 °C for over two weeks [161].

Future death rates are hard to predict because nothing of the kind has occurred in human history and the negative consequences of AGW as listed by the IPCC are diverse. They include hunger, disease, direct heat, extreme weather events (which kill not only directly but also because they cause long-term health problems), violence (e.g., wars over diminishing resources such as water), and immigration. In a first approximation, the various AGW-related causes of death will be added. It should be pointed out, there will

also be interactions, so the whole will be greater than the sum of the parts [163]. For example, people are more likely to die during an extreme storm if they are already weak from years of famine.

As global temperatures increase, uninhabitable areas will grow (e.g., in the Middle East). People in those areas who cannot rely on air conditioning or some other cooling strategy (e.g., cool swimming holes) during heat waves, or cannot afford to buy food and water or protect themselves in times of conflict, will be forced to migrate. They will join the swelling tide of climate refugees [44], risking their lives to find a new place to live.

It has been estimated that there will be roughly one billion additional deaths for each degree of warming [59], meaning that 3 °C of warming would kill 2 billion people. That estimate is probably conservative if one considers the geographical areas that today occasionally suffer from deadly humid heat (with wet-bulb temperature exceeding skin temperature). Predicting the locations of such areas at different levels of warming using climate models, one might predict 3 billion deaths from direct heat alone at 3 °C of warming [164].

During the 21st century, the population of Africa may rise by a factor of three, from 1.3 billion to roughly 4.2 billion [165]. Those people will only survive if there is enough food. Along with other problems such as biodiversity loss and soil degradation, AGW will seriously affect food productivity. In the long term, it is challenging for Africa's food production to be sustainably increased to feed its growing population. In addition, food distribution will be affected by conflict (the 2022 invasion of Ukraine being an example). From what is known today about AGW, a massive, unprecedented, and seemingly never-ending catastrophe appears to be inevitable.

The calculations presented are conservative relative to some other published estimates of relevant death tolls. For example, Ziegler estimated that 35 million people die each year in connection with hunger [166]—much more than the estimate of 10 million deaths per year in connection with poverty that is used here. Ziegler's estimate is relevant because many of the people who will die prematurely in the future as an indirect consequence of AGW will die of hunger, and the estimate of "one billion" can be made on the basis of expected increases in existing death rates from hunger. Today around 9 million people die every year from hunger and hunger-related diseases [167]. This ethical challenge continues despite the global availability of more than enough human edible calories [168], but several studies have indicated that the entire human population could be maintained even with a loss of all conventional agriculture during a global catastrophe [169,170].

#### 4.4. Causes of Death and Future Work

Causes of death often overlap. Intertwined effects include for example the effect of maternal mortality on neonatal survival rates [171]. Whether poverty is the cause of death in a specific instance is difficult to operationalize. If a life could be saved by spending a reasonable amount of money, and that money was not spent, and the person died as a result, one can argue that poverty was the cause of death. Based on World Health Organization data Pogge [172,173] estimated that:

*Some eighteen million human beings die prematurely each year from medical conditions we can cure—this is equivalent to fifty thousand avoidable deaths per day.*

Moreover,

*One-third of all human lives end in early death from poverty-related causes. Most of these premature deaths are avoidable through global institutional reforms that would eradicate extreme poverty. Many are also avoidable through global health-system reform that would make medical knowledge freely available as a global public good.*

UNICEF has estimated that as many as 22,000 children are dying daily due to poverty, or 8 million per year [167]. Another source claims that 35 million people are currently likely to die from hunger, presumably in the next few years [174]. In addition to poverty, AGW will kill humans in multiple ways. By about 2070, up to 3 billion people will live in

places that from today's perspective will be too hot to survive in [175]. Storms and floods kill directly, but also indirectly, by causing epidemics. Droughts kill when drinking water or food runs out. Rising seas kill when people are forced to leave their land and become migrants. In all these cases, poverty and AGW combine to cause human deaths.

Mortality from direct heat will depend on wealth or poverty as much as it depends on temperature. People with money own air conditioners that work when they need them or have access to a cool refuge in thermal emergencies. If current trends continue, the most common cause of premature death in the coming decades and centuries will be a combination of two broad factors: AGW and poverty. People with money will mostly be able to adapt. Others will not, with fatal consequences.

In the academic literature, death from direct heat is normally (and somewhat misleadingly) called "temperature-related mortality". In fact, all causes of death in connection with AGW are "temperature-related", some being more directly or immediately related to temperature than others. Famines, floods, and fires are less directly temperature-related: AGW changes rainfall, wind, and temperature patterns, which in turn cause famines, floods, and fires. To be clear, it may help to regard deaths from such events as "second-order" or "indirect" temperature-related mortality.

The number of deaths from direct heat may increase non-linearly (although not necessarily exponentially) as the temperature rises. In that way, the increase in mortality will not be the same for each fraction of a degree of AGW. For example, the increase in mortality caused by a global mean temperature increases from 1.5° to 1.6 °C relative to pre-industrial temperatures will probably be less than the increase in mortality caused by raising global temperature from 2.5° to 2.6 °C. The 1000-tonne rule applies to global warming of less than 2 °C, and more work is needed to model possible non-linearities at higher temperatures.

Future work is needed to better attribute current death rates to AGW. The World Health Organization has estimated that between 2030 and 2050 climate change will cause 250,000 additional deaths per year due to malnutrition, malaria, diarrhea and heat stress [67]. The WHO used a bottom-up estimate, extrapolating from existing death tolls without considering unexpected or non-linear effects in the future. These, of course, are hard to predict. They include war (e.g., conflicts over limited resources like water), migration (due to rising sea levels and other catastrophic effects of AGW), and effects of unprecedented floods, water shortages, and storms). In addition, more accurate quantification of the impact of AGW efforts should be made using the up-to-date DALY concept and these results should be compared to the more simplistic total deaths used here.

For the past few decades, the global death rate in connection with poverty has steadily declined in response to international development aid and economic growth in the Global South. Unfortunately, the global number of deaths from hunger (starvation) is now increasing again [176]. The positive effect of economic growth in developing countries and international aid, which together previously caused mortality to decrease, is gradually being overwhelmed, not only by various negative effects of AGW (drought, flooding, fires, storms, disease spread, migration, conflict) but also by rising food prices linked to the emergence of global food monopolies; up to 90% of global trade in grain is controlled by just four corporations [177]. In addition, in 2020 and 2021, the COVID-19 pandemic caused an increase in death rates in connection with poverty [178]. Meanwhile, although the global death rate from malaria fell from 2010 to 2014, it increased again from 2015 to 2020, but the increase was partly due to changes in methodology for attributing cause of death [179]. Future work is needed to disaggregate different causes of death attributed to AGW.

Given the many negative consequences of AGW, combined with biodiversity loss and population growth, our grandchildren will not be surprised when in the year 2100 the death rate in connection with poverty has doubled relative to 2000, from roughly 10 million to roughly 20 million per year. From the vantage point of the year 2023, doubling seems conservative, given the number and diversity of disastrous climate events in the news and corresponding predictions in mainstream peer-reviewed scientific journals.

Future AGW death rates will depend on other population trends. The number of people that will be alive at a given time in the future (and therefore available to die from AGW) is hard to predict and can hardly be estimated more accurately than predicted death tolls in different warming scenarios, which are little more than orders of magnitude. In many developed nations the birth rate has dropped far below the replacement rate already today. For example, South Korea only has 0.8 children per couple [180] and even the USA is at 1.78, which is below the replacement rate [181]. If these trends continue to spread into other nations, there may be fewer deaths caused by AGW simply because there will be fewer people. These trends, however, may be interdependent: some couples are avoiding children because of climate concerns (1 in 4 childless adults in the USA) [182]. Overall, this review has made it clear there is far more work needed in this area to help guide appropriate energy policies.

## 5. Conclusions

This is the first review to analyze the substantial body of literature that enables approximate quantitative estimation of the human cost of carbon emissions, measured in lost human lives. The greatest risk to future human life is probably climate change, although biodiversity loss and nuclear war also pose enormous existential risks. It can be concluded from the results of this review, that as a rough rule of thumb, burning roughly 1000 tons of fossil carbon (creating 3700 tons of CO<sub>2</sub>) causes one future premature death. Measuring carbon emissions in human lives not only makes the numbers easier to understand for nonexperts but also clarifies energy policy priorities: clearly, allowing a policy to cause manslaughter is intuitively unacceptable.

The high death tolls that can be attributed to current carbon emissions and that follow from this analysis have immediate and direct energy policy implications. The primary goal of all current energy policies should be to reduce carbon emissions to zero as fast as possible without causing additional deaths and to eliminate any policy that increases emissions or incentives future fossil carbon extraction. For this purpose, far more aggressive energy policies are warranted than are currently used in most jurisdictions. To save millions of lives it is ethically, morally, and logically acceptable to radically accelerate existing trends in energy efficiency, electrification, and the use of renewable energy, with the goal of powering global society without any fossil fuels at all. Future work is needed to flesh out the detailed implementation of such policies and make more precise estimations of future death tolls in connection with AGW.

**Author Contributions:** Conceptualization, R.P. and J.M.P.; methodology, J.M.P.; validation, R.P. and J.M.P.; formal analysis, R.P. and J.M.P.; investigation, R.P. and J.M.P.; resources, R.P. and J.M.P.; writing—original draft preparation, R.P. and J.M.P.; writing—review and editing, R.P. and J.M.P.; visualization, J.M.P.; funding acquisition, R.P. and J.M.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was supported by the Thompson Endowment.

**Data Availability Statement:** Data is available upon request.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

## References

1. Ripple, W.J.; Wolf, C.; Newsome, T.M.; Galetti, M.; Alamgir, M.; Crist, E.; Mahmoud, M.I.; Laurance, W.F. World Scientists' Warning to Humanity: A Second Notice. *BioScience* **2017**, *67*, 1026–1028. [[CrossRef](#)]
2. Hansen, J.; Kharecha, P.; Sato, M.; Masson-Delmotte, V.; Ackerman, F.; Beerling, D.J.; Hearty, P.J.; Hoegh-Guldberg, O.; Hsu, S.-L.; Parmesan, C. Assessing "Dangerous Climate Change": Required Reduction of Carbon Emissions to Protect Young People, Future Generations and Nature. *PLoS ONE* **2013**, *8*, 81648. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

3. Pachauri, R.K.; Allen, M.R.; Barros, V.R.; Broome, J.; Cramer, W.; Christ, R.; Church, J.A.; Clarke, L.; Dahe, Q.; Dasgupta, P.; et al. Synthesis Report. In *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; p. 151.
4. Tangney, P. Understanding Climate Change as Risk: A Review of IPCC Guidance for Decision-Making. *J. Risk Res.* **2020**, *23*, 1424–1439. [[CrossRef](#)]
5. Stern, N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2007; ISBN 978-0-521-70080-1.
6. Moss, R.H.; Edmonds, J.A.; Hibbard, K.A.; Manning, M.R.; Rose, S.K.; Van Vuuren, D.P.; Carter, T.R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T.; et al. The next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature* **2010**, *463*, 747–756. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Dhainaut, J.F.; Claessens, Y.E.; Ginsburg, C.; Riou, B. Unprecedented Heat-Related Deaths during the 2003 Heat Wave in Paris: Consequences on Emergency Departments. *Crit. Care* **2003**, *8*, 1. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. Poumadère, M.; Mays, C.; Le Mer, S.; The, B.R. Heat Wave in France: Dangerous Climate Change Here and Now: The 2003 Heat Wave in France. *Risk Anal.* **2003**, *25*, 1483–1494. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
9. Fouillet, A.; Rey, G.; Laurent, F.; Pavillon, G.; Bellec, S.; Guihenneuc-Jouyau, C.; Clavel, J.; Jouglu, E.; Hémon, D. Excess Mortality Related to the August 2003 Heat Wave in France. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **2006**, *80*, 16–24. [[CrossRef](#)]
10. D’Amato, G.; Cecchi, L. Effects of Climate Change on Environmental Factors in Respiratory Allergic Diseases. *Clin. Exp. Allergy* **2008**, *38*, 1264–1274. [[CrossRef](#)]
11. Gislason, A.; Gorsky, G. *Proceedings of the Joint ICES/CIESM Workshop to Compare Zooplankton Ecology and Methodologies between the Mediterranean and the North Atlantic (WKZEM)*; ICES: Copenhagen, Denmark, 2010.
12. Parry, M.; Rosenzweig, C.; Livermore, M. Climate Change, Global Food Supply and Risk of Hunger. *Philos. Trans. R. Soc. Bio. Sci.* **2005**, *360*, 2125–2138. [[CrossRef](#)]
13. Parry, M.L.; Rosenzweig, C.; Iglesias, A.; Livermore, M.; Fischer, G. Effects of Climate Change on Global Food Production under SRES Emissions and Socio-Economic Scenarios. *Glob. Environ. Chang.* **2004**, *14*, 53–67. [[CrossRef](#)]
14. Schmidhuber, J.; Tubiello, F.N. Global Food Security under Climate Change. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* **2007**, *104*, 19703–19708. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Dai, A. Drought under Global Warming: A Review. *WIREs Clim. Chang.* **2011**, *2*, 45–65. [[CrossRef](#)]
16. Diffenbaugh, N.S.; Swain, D.L.; Touma, D. Anthropogenic Warming Has Increased Drought Risk in California. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2015**, *112*, 3931–3936. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Mann, M.E.; Gleick, P.H. Climate Change and California Drought in the 21st Century. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2015**, *112*, 3858–3859. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
18. Dale, V.H.; Joyce, L.A.; McNulty, S.; Neilson, R.P.; Ayres, M.P.; Flannigan, M.D.; Hanson, P.J.; Irland, L.C.; Lugo, A.E.; Peterson, C.J.; et al. Climate Change and Forest Disturbances: Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience* **2001**, *51*, 723–734. [[CrossRef](#)]
19. Amiro, B.D.; Stocks, B.J.; Alexander, M.E.; Flannigan, M.D.; Wotton, B.M. Fire, Climate Change, Carbon and Fuel Management in the Canadian Boreal Forest. *Int. J. Wildland Fire* **2001**, *10*, 405–413. [[CrossRef](#)]
20. Flannigan, M.; Stocks, B.; Turetsky, M.; Wotton, M. Impacts of Climate Change on Fire Activity and Fire Management in the Circumboreal Forest. *GCB* **2009**, *15*, 549–560. [[CrossRef](#)]
21. Johnson, R.J.; Sánchez-Lozada, L.G.; Newman, L.S.; Lanaspá, M.A.; Diaz, H.F.; Lemery, J.; Rodriguez-Iturbe, B.; Tolan, D.R.; Butler-Dawson, J.; Sato, Y.; et al. Climate Change and the Kidney. *Ann. Nutr. Metab.* **2019**, *74*, 38–44. [[CrossRef](#)]
22. El Khayat, M.; Halwani, D.A.; Hneiny, L.; Alameddine, I.; Haidar, M.A.; Habib, R.R. Impacts of Climate Change and Heat Stress on Farmworkers’ Health: A Scoping Review. *Front. Public Health* **2022**, *10*, 71. [[CrossRef](#)]
23. Raulerson, M. Latest IPCC Report Projects Climate Change Will Increase Migration Within Africa. 2022. Available online: <https://www.climate-refugees.org/spotlight/2022/3/3/ipcc-africa> (accessed on 24 June 2023).
24. Cooper, M.; Brown, M.E.; Azzarri, C.; Meinzen-Dick, R. Hunger, Nutrition, and Precipitation: Evidence from Ghana and Bangladesh. *Popul. Environ.* **2019**, *41*, 151–208. [[CrossRef](#)]
25. Moorhead, K.K.; Brinson, M.M. Response of Wetlands to Rising Sea Level in the Lower Coastal Plain of North Carolina. *Ecol. Appl.* **1995**, *5*, 261. [[CrossRef](#)]
26. Frihy, O.E. The Nile Delta-Alexandria Coast: Vulnerability to Sea-Level Rise, Consequences and Adaptation. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* **2003**, *8*, 115–138. [[CrossRef](#)]
27. Bobba, A.G. Numerical Modelling of Salt-Water Intrusion Due to Human Activities and Sea-Level Change in the Godavari Delta, India. *Hydrol. Sci. J.* **2002**, *47*, 67–80. [[CrossRef](#)]
28. Nicholls, R.J.; Hoozemans, F.M.; Marchand, M. Increasing Flood Risk and Wetland Losses Due to Global Sea-Level Rise: Regional and Global Analyses. *Glob. Environ. Chang.* **1999**, *9*, 69–87. [[CrossRef](#)]
29. Desantis, L.R.; Bhotika, S.; Williams, K.; Putz, F.E. Sea-level rise and drought interactions accelerate forest decline on the Gulf Coast of Florida, USA. *Glob. Chang. Biol.* **2007**, *13*, 2349–2360. [[CrossRef](#)]

30. Allen, C.D.; Macalady, A.K.; Chenchouni, H.; Bachelet, D.; McDowell, N.; Vennetier, M.; Kitzeberger, T.; Rigling, A.; Breshears, D.D.; Hogg, E.H.; et al. A Global Overview of Drought and Heat-Induced Tree Mortality Reveals Emerging Climate Change Risks for Forests. *For. Ecol. Manag.* **2010**, *259*, 660–684. [[CrossRef](#)]
31. Ibrahim, B.; Mensah, H. Rethinking Climate Migration in Sub-Saharan Africa from the Perspective of Tripartite Drivers of Climate Change. *SN Soc. Sci.* **2022**, *2*, 87. [[CrossRef](#)]
32. Gensini, V.A. Chapter 4—Severe Convective Storms in a Changing Climate. In *Climate Change and Extreme Events*; Fares, A., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 39–56, ISBN 978-0-12-822700-8.
33. Smith, A.B.; Katz, R.W. US Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: Data Sources, Trends, Accuracy and Biases. *Nat. Hazards* **2013**, *67*, 387–410. [[CrossRef](#)]
34. Oliver-Smith, A. Hurricanes, Climate Change, and the Social Construction of Risk. *Int. J. Mass Emergencies Disasters* **2020**, *38*, 1–12. [[CrossRef](#)]
35. Vine, E. Adaptation of California’s Electricity Sector to Climate Change. *Clim. Chang.* **2012**, *111*, 75–99. [[CrossRef](#)]
36. Val, D.V.; Yurchenko, D.; Nogal, M.; O’Connor, A. Chapter Seven—Climate Change-Related Risks and Adaptation of Interdependent Infrastructure Systems. In *Climate Adaptation Engineering*; Bastidas-Arteaga, E., Stewar, M.G., Eds.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, 2019; pp. 207–242, ISBN 978-0-12-816782-3.
37. Dupont, A. The Strategic Implications of Climate Change. *Survival* **2008**, *50*, 29–54. [[CrossRef](#)]
38. Webersik, C. *Climate Change and Security: A Gathering Storm of Global Challenges: A Gathering Storm of Global Challenges*; ABC-CLIO: Santa Barbara, CA, USA, 2010; ISBN 978-0-313-38007-5.
39. La Shier, B.; Stanish, J. The National Security Impacts of Climate Change. *J. Nat’l Sec. L. Pol’y* **2019**, *10*, 27–44.
40. Sharifi, A.; Simangan, D.; Kaneko, S. Three Decades of Research on Climate Change and Peace: A Bibliometrics Analysis. *Sustain. Sci.* **2021**, *16*, 1079–1095. [[CrossRef](#)]
41. National Intelligence Estimate on Climate Change. Available online: <https://www.dni.gov/index.php/newsroom/reports-publications/reports-publications-2021/item/2253-national-intelligence-estimate-on-climate-change> (accessed on 18 July 2023).
42. Biermann, F.; Boas, I. Protecting Climate Refugees: The Case for a Global Protocol. *Environ. Sci. Policy Sustain. Dev.* **2008**, *50*, 8–17.
43. Farbotko, C.; Lazrus, H. The First Climate Refugees? Contesting Global Narratives of Climate Change in Tuvalu. *Glob. Environ. Chang.* **2012**, *22*, 382–390. [[CrossRef](#)]
44. Berchin, I.I.; Valduga, I.B.; Garcia, J.; de Andrade Guerra, J.B.S.O. Climate Change and Forced Migrations: An Effort towards Recognizing Climate Refugees. *Geoforum* **2017**, *84*, 147–150. [[CrossRef](#)]
45. Richards, C.E.; Lupton, R.C.; Allwood, J.M. Re-Framing the Threat of Global Warming: An Empirical Causal Loop Diagram of Climate Change, Food Insecurity and Societal Collapse. *Clim. Chang.* **2021**, *164*, 49. [[CrossRef](#)]
46. Kemp, L.; Xu, C.; Depledge, J.; Ebi, K.L.; Gibbins, G.; Kohler, T.A.; Rockström, J.; Scheffer, M.; Schellnhuber, H.J.; Steffen, W.; et al. Climate Endgame: Exploring Catastrophic Climate Change Scenarios. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2022**, *119*, e2108146119. [[CrossRef](#)]
47. Tasioulas, J. Towards a Philosophy of Human Rights. *Curr. Leg. Probl.* **2012**, *65*, 1–30. [[CrossRef](#)]
48. Nolt, J. Casualties as a Moral Measure of Climate Change. *Clim. Chang.* **2015**, *130*, 347–358. [[CrossRef](#)]
49. Oliver, A. Disability Adjusted Life Years (DALYs) for Decision-making? An Overview of the Literature: Julia A. Fox-Rushby; Office of Health Economics, 2002, 172 pages, ISBN 1-899040-37-4, £10. *Public Health* **2005**, *119*, 155. [[CrossRef](#)]
50. Polinder, S.; Haagsma, J.A.; Stein, C.; Havelaar, A.H. Systematic Review of General Burden of Disease Studies Using Disability-Adjusted Life Years. *Popul. Health Metr.* **2012**, *10*, 21. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
51. Gao, T.; Wang, X.C.; Chen, R.; Ngo, H.H.; Guo, W. Disability Adjusted Life Year (DALY): A Useful Tool for Quantitative Assessment of Environmental Pollution. *Sci. Total Environ.* **2015**, *511*, 268–287. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Chen, A.; Jacobsen, K.H.; Deshmukh, A.A.; Cantor, S.B. The Evolution of the Disability-Adjusted Life Year (DALY). *Socio-Econ. Plan. Sci.* **2015**, *49*, 10–15. [[CrossRef](#)]
53. Anand, S.; Hanson, K. Disability-Adjusted Life Years: A Critical Review. *J. Health Econ.* **1997**, *16*, 685–702. [[CrossRef](#)]
54. Arnesen, T.; Nord, E. The Value of DALY Life: Problems with Ethics and Validity of Disability Adjusted Life Years. *BMJ* **1999**, *319*, 1423–1425. [[CrossRef](#)]
55. Grosse, S.D.; Lollar, D.J.; Campbell, V.A.; Chamie, M. Disability and Disability-Adjusted Life Years: Not the Same. *Public Health Rep.* **2009**, *124*, 197–202. [[CrossRef](#)]
56. Rushby, J.F.; Hanson, K. Calculating and Presenting Disability Adjusted Life Years (DALYs) in Cost-Effectiveness Analysis. *Health Policy Plan.* **2001**, *16*, 326–331. [[CrossRef](#)]
57. Tokarska, K.B.; Gillett, N.P.; Weaver, A.J.; Arora, V.K.; Eby, M. The Climate Response to Five Trillion Tonnes of Carbon. *Nat. Clim. Chang.* **2016**, *6*, 851–855. [[CrossRef](#)]
58. Hone, D. *Putting the Genie Back: Solving the Climate and Energy Dilemma*; Emerald Group Publishing: Bingley, UK, 2017; ISBN 978-1-78714-932-8.
59. Parncutt, R. The Human Cost of Anthropogenic Global Warming: Semi-Quantitative Prediction and the 1,000-Tonne Rule. *Front. Psychol.* **2019**, *10*, 2323. [[CrossRef](#)]

60. Carrington, D. Humans Just 0.01% of All Life but Have Destroyed 83% of Wild Mammals—Study. *The Guardian*. 2018. Available online: <https://capitalscoalition.org/humans-just-0-01-of-all-life-but-have-destroyed-83-of-wild-mammals-study/> (accessed on 24 June 2023).
61. Allen, M.R.; Frame, D.J.; Huntingford, C.; Jones, C.D.; Lowe, J.A.; Meinshausen, M.; Meinshausen, N. Warming Caused by Cumulative Carbon Emissions towards the Trillionth Tonne. *Nature* **2009**, *458*, 1163–1166. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
62. Richards, C.E.; Gauch, H.L.; Allwood, J.M. International Risk of Food Insecurity and Mass Mortality in a Runaway Global Warming Scenario. *Futures* **2023**, *150*, 103173. [[CrossRef](#)]
63. Huffpost Climate Change Deaths Could Total 100 Million by 2030 If World Fails to Act 2012. Available online: [https://www.huffpost.com/entry/climate-change-deaths\\_n\\_1915365](https://www.huffpost.com/entry/climate-change-deaths_n_1915365) (accessed on 24 June 2023).
64. Vollset, S.E.; Goren, E.; Yuan, C.-W.; Cao, J.; Smith, A.E.; Hsiao, T.; Bisignano, C.; Azhar, G.S.; Castro, E.; Chalek, J.; et al. Fertility, Mortality, Migration, and Population Scenarios for 195 Countries and Territories from 2017 to 2100: A Forecasting Analysis for the Global Burden of Disease Study. *Lancet* **2020**, *396*, 1285–1306. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
65. Denkenberger, D.C.; Pearce, J.M. Cost-Effectiveness of Interventions for Alternate Food to Address Agricultural Catastrophes Globally. *Int. J. Disaster Risk Sci.* **2016**, *7*, 205–215. [[CrossRef](#)]
66. Steffen, W.; Rockström, J.; Richardson, K.; Lenton, T.M.; Folke, C.; Liverman, D.; Summerhayes, C.P.; Barnosky, A.D.; Cornell, S.E.; Crucifix, M.; et al. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2018**, *115*, 8252–8259. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
67. World Health Organisation. *Climate Change and Health*; WHO: Geneva, Switzerland, 2018.
68. Nolt, J. How Harmful Are the Average American’s Greenhouse Gas Emissions? *Ethics Policy Environ.* **2011**, *14*, 3–10. [[CrossRef](#)]
69. Bressler, R.D. The Mortality Cost of Carbon. *Nat. Commun.* **2021**, *12*, 4467. [[CrossRef](#)]
70. Milman, O. Three Americans Create Enough Carbon Emissions to Kill One Person, Study Finds. *The Guardian*. 29 July 2021. Available online: <https://www.theguardian.com/environment/2021/jul/29/carbon-emissions-americans-social-cost> (accessed on 24 June 2023).
71. Xu, C.; Kohler, T.A.; Lenton, T.M.; Svenning, J.-C.; Scheffer, M. Future of the Human Climate Niche. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2020**, *117*, 11350–11355. [[CrossRef](#)]
72. Lenton, T.M.; Xu, C.; Abrams, J.F.; Ghadiali, A.; Loraiani, S.; Sakschewski, B.; Scheffer, M. Quantifying the Human Cost of Global Warming. *Nat. Sustain.* **2023**, 1–11. [[CrossRef](#)]
73. Hutchinson, G.E. Concluding remarks. *Cold Spring Harb. Symp.* **1957**, *22*, 415–427. [[CrossRef](#)]
74. Welzer, H. *Climate Wars: What People Will Be Killed for in the 21st Century*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015; ISBN 978-1-5095-0161-8.
75. Lenton, T.M. Beyond 2 °C: Redefining Dangerous Climate Change for Physical Systems. *WIREs Clim. Chang.* **2011**, *2*, 451–461. [[CrossRef](#)]
76. Diffenbaugh, N.S.; Barnes, E.A. Data-Driven Predictions of the Time Remaining until Critical Global Warming Thresholds Are Reached. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2023**, *120*, e2207183120. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
77. Canada CO<sub>2</sub> Emissions—Worldometer. Available online: <https://www.worldometers.info/co2-emissions/canada-co2-emissions/> (accessed on 24 June 2023).
78. Economics in Canada Compared to the EU. Available online: <https://www.worlddata.info/america/canada/economy.php> (accessed on 24 June 2023).
79. Ghorri, A. *Will Canada Benefit from Climate Change?* Canadian Climate Institute: Ottawa, ON, Canada, 2021; Available online: <https://climateinstitute.ca/will-canada-benefit-from-climate-change/> (accessed on 24 June 2023).
80. Kaminski, I. Did Climate Change Cause Canada’s Wildfires? Available online: <https://www.bbc.com/future/article/20230612-did-climate-change-cause-canadas-wildfires> (accessed on 18 July 2023).
81. Mendelsohn, R.; Dinar, A.; Williams, L. The Distributional Impact of Climate Change on Rich and Poor Countries. *Environ. Dev. Econ.* **2006**, *11*, 159–178. [[CrossRef](#)]
82. Costello, A.; Abbas, M.; Allen, A.; Ball, S.; Bell, S.; Bellamy, R.; Friel, S.; Groce, N.; Johnson, A.; Kett, M.; et al. Managing the Health Effects of Climate Change: Lancet and University College London Institute for Global Health Commission. *Lancet* **2009**, *373*, 1693–1733. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
83. Dube, T.; Moyo, P.; Ncube, M.; Nyathi, D. The Impact of Climate Change on Agro-Ecological Based Livelihoods in Africa: A Review. *J. Sustain. Dev.* **2016**, *9*, 256–267. [[CrossRef](#)]
84. Carmichael Mine | Bravus Mining & Resources. Available online: <https://www.bravusmining.com.au/carmichael-mine/> (accessed on 24 June 2023).
85. Amann, D.M. Capital Punishment: Corporate Criminal Liability for Gross Violations of Human Rights Symposium: Holding Multinational Corporations Responsible under International Law. *Hastings Int’l Comp. L. Rev.* **2000**, *24*, 327–338.
86. Yaron, G. *Awakening Sleeping Beauty: Reviving Lost Memories and Discourses to Revoke Corporate Charters*. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2000.
87. Noonan, K. The Case for a Federal Corporate Charter Revocation Penalty Note. *Geo. Wash. L. Rev.* **2011**, *80*, 602–631.

88. Grossman, D.I. Would a Corporate Death Penalty Be Cruel and Unusual Punishment Ntoe. *Cornell J. L. Pub. Pol'y* **2015**, *25*, 697–722.
89. Ramirez, M.K.; Ramirez, S.A. The Case for the Corporate Death Penalty: Restoring Law and Order on Wall Street. In *The Case for the Corporate Death Penalty*; New York University Press: New York, NY, USA, 2017; ISBN 978-1-4798-7852-9.
90. Hulpke, J.F. If All Else Fails, A Corporate Death Penalty? *J. Manag. Inq.* **2017**, *26*, 433–439. [[CrossRef](#)]
91. Pearce, J.M. Towards Quantifiable Metrics Warranting Industry-Wide Corporate Death Penalties. *Soc. Sci.* **2019**, *8*, 62. [[CrossRef](#)]
92. Use of Coal—U.S. Energy Information Administration (EIA). Available online: <https://www.eia.gov/energyexplained/coal/use-of-coal.php> (accessed on 24 June 2023).
93. Nations, U. Universal Declaration of Human Rights. Available online: <https://www.un.org/en/about-us/universal-declaration-of-human-rights> (accessed on 24 June 2023).
94. Weisser, D. A Guide to Life-Cycle Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Electric Supply Technologies. *Energy* **2007**, *32*, 1543–1559. [[CrossRef](#)]
95. Ross, A.B.; Jones, J.M.; Chaiklangmuang, S.; Pourkashanian, M.; Williams, A.; Kubica, K.; Andersson, J.T.; Kerst, M.; Danihelka, P.; Bartle, K.D. Measurement and Prediction of the Emission of Pollutants from the Combustion of Coal and Biomass in a Fixed Bed Furnace. *Fuel* **2002**, *81*, 571–582. [[CrossRef](#)]
96. Gaffney, J.S.; Marley, N.A. The Impacts of Combustion Emissions on Air Quality and Climate—From Coal to Biofuels and Beyond. *Atmos. Environ.* **2009**, *43*, 23–36. [[CrossRef](#)]
97. Epstein, P.R.; Buonocore, J.J.; Eckerle, K.; Hendryx, M.; Stout III, B.M.; Heinberg, R.; Clapp, R.W.; May, B.; Reinhart, N.L.; Ahern, M.M.; et al. Full Cost Accounting for the Life Cycle of Coal. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **2011**, *1219*, 73–98. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
98. Finkelman, R.B.; Orem, W.; Castranova, V.; Tatu, C.A.; Belkin, H.E.; Zheng, B.; Lerch, H.E.; Maharaj, S.V.; Bates, A.L. Health Impacts of Coal and Coal Use: Possible Solutions. *Int. J. Coal Geol.* **2002**, *50*, 425–443. [[CrossRef](#)]
99. Curtis, L.; Rea, W.; Smith-Willis, P.; Fenyves, E.; Pan, Y. Adverse Health Effects of Outdoor Air Pollutants. *Environ. Int.* **2006**, *32*, 815–830. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
100. Markandya, A.; Wilkinson, P. Electricity Generation and Health. *Lancet* **2007**, *370*, 979–990. [[CrossRef](#)]
101. Smith, K.R.; Frumkin, H.; Balakrishnan, K.; Butler, C.D.; Chafe, Z.A.; Fairlie, I.; Kinney, P.; Kjellstrom, T.; Mauzerall, D.L.; McKone, T.E.; et al. Energy and Human Health. *Annu. Rev. Public Health* **2013**, *34*, 159–188. [[CrossRef](#)]
102. Cohen, A.J.; Ross Anderson, H.; Ostro, B.; Pandey, K.D.; Krzyzanowski, M.; Künzli, N.; Gutschmidt, K.; Pope, A.; Romieu, I.; Samet, J.M.; et al. The Global Burden of Disease Due to Outdoor Air Pollution. *J. Toxicol. Environ. Health Part A* **2005**, *68*, 1301–1307. [[CrossRef](#)]
103. Penney, S.; Bell, J.; Balbus, J. Estimating the Health Impacts of Coal-Fired Power Plants Receiving International Financing. *Rep. Environ. Def. Fund* **2009**. Available online: [https://www.edf.org/sites/default/files/9553\\_coal-plants-health-impacts.pdf](https://www.edf.org/sites/default/files/9553_coal-plants-health-impacts.pdf) (accessed on 24 June 2023).
104. Vohra, K.; Vodonos, A.; Schwartz, J.; Marais, E.A.; Sulprizio, M.P.; Mickley, L.J. Global Mortality from Outdoor Fine Particle Pollution Generated by Fossil Fuel Combustion: Results from GEOS-Chem. *Environ. Res.* **2021**, *195*, 110754. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
105. Caiazzo, F.; Ashok, A.; Waitz, I.A.; Yim, S.H.L.; Barrett, S.R.H. Air Pollution and Early Deaths in the United States. Part I: Quantifying the Impact of Major Sectors in 2005. *Atmos. Environ.* **2013**, *79*, 198–208. [[CrossRef](#)]
106. McGeehin, M.A.; Mirabelli, M. The Potential Impacts of Climate Variability and Change on Temperature-Related Morbidity and Mortality in the United States. *Environ. Health Perspect.* **2001**, *109*, 185–189. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
107. McMichael, A.J.; Woodruff, R.E.; Hales, S. Climate Change and Human Health: Present and Future Risks. *Lancet* **2006**, *367*, 859–869. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
108. Haines, A.; Kovats, R.S.; Campbell-Lendrum, D.; Corvalan, C. Climate Change and Human Health: Impacts, Vulnerability and Public Health. *Public Health* **2006**, *120*, 585–596. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
109. Heidari, N.; Pearce, J.M. A Review of Greenhouse Gas Emission Liabilities as the Value of Renewable Energy for Mitigating Lawsuits for Climate Change Related Damages. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *55*, 899–908. [[CrossRef](#)]
110. Ban Fossil Fuel Advertising and Sponsorships! Available online: <https://banfossilfuelads.org/> (accessed on 24 June 2023).
111. Chen, Y.; Zhu, Z. Liability Structure and Carbon Emissions Abatement: Evidence from Chinese Manufacturing Enterprises. *Environ. Resour. Econ.* **2022**, *83*, 481–507. [[CrossRef](#)]
112. Farber, D.A. Tort Law in the Era of Climate Change, Katrina, and 9/11: Exploring Liability for Extraordinary Risks Lecture. *Val. U. L. Rev.* **2008**, *43*, 1075–1130. [[CrossRef](#)]
113. Farber, D.A. Apportioning Climate Change Costs. *UCLA J. Envtl. L. Pol'y* **2008**, *26*, 21–54. [[CrossRef](#)]
114. Farber, D.A. The Case for Climate Compensation: Justice for Climate Change Victims in a Complex World. *Utah L. Rev.* **2008**, *2008*, 377–414.
115. Pascaris, A.S.; Pearce, J.M. U.S. Greenhouse Gas Emission Bottlenecks: Prioritization of Targets for Climate Liability. *Energies* **2020**, *13*, 3932. [[CrossRef](#)]
116. Cassella, S.D. *Asset Forfeiture Law in the United States*, 2nd ed.; Juris Publishing, Inc.: Huntington, NY, USA, 2013; ISBN 978-1-57823-365-6.
117. Branch, L.S. Consolidated Federal Laws of Canada, Criminal Code. Available online: <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/C-46/page-207.html#h-134> (accessed on 26 July 2023).

118. Kealy, S.J. A Proposal for a New Massachusetts Notoriety-for-Profit Law: The Grandson of Sam. *W. N. Eng. L. Rev.* **2000**, *22*, 1–44.
119. Supran, G.; Oreskes, N. Assessing ExxonMobil's Climate Change Communications (1977–2014). *Environ. Res. Lett.* **2017**, *12*, 084019. [[CrossRef](#)]
120. Cavallaro, C.M.; Pearce, J.M.; Sidortsov, R. Decarbonizing the Boardroom? Aligning Electric Utility Executive Compensation with Climate Change Incentives. *Energy Res. Soc. Sci.* **2018**, *37*, 153–162. [[CrossRef](#)]
121. Jean-Baptiste, P.; Ducroux, R. Energy Policy and Climate Change. *Energy Policy* **2003**, *31*, 155–166. [[CrossRef](#)]
122. Worrell, E.; Bernstein, L.; Roy, J.; Price, L.; Harnisch, J. Industrial Energy Efficiency and Climate Change Mitigation. *Energy Effic.* **2009**, *2*, 109–123. [[CrossRef](#)]
123. Pisante, M.; Stagnari, F.; Acutis, M.; Bindi, M.; Brilli, L.; Di Stefano, V.; Carozzi, M. Conservation Agriculture and Climate Change. In *Conservation Agriculture*; Farooq, M., Siddique, K.H.M., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2015; pp. 579–620, ISBN 978-3-319-11620-4.
124. Litman, T.; Burwell, D. Issues in Sustainable Transportation. *Int. J. Glob. Environ. Issues* **2006**, *6*, 331–347. [[CrossRef](#)]
125. Barkenbus, J.N. Eco-Driving: An Overlooked Climate Change Initiative. *Energy Policy* **2010**, *38*, 762–769. [[CrossRef](#)]
126. Bulkeley, H.; Betsill, M. Rethinking Sustainable Cities: Multilevel Governance and the “Urban” Politics of Climate Change. *Environ. Politics* **2005**, *14*, 42–63. [[CrossRef](#)]
127. Reyna, J.L.; Chester, M.V. Energy Efficiency to Reduce Residential Electricity and Natural Gas Use under Climate Change. *Nat. Commun.* **2017**, *8*, 14916. [[CrossRef](#)]
128. Gardner, G.T.; Stern, P.C. The Short List: The Most Effective Actions U.S. Households Can Take to Curb Climate Change. *Environ. Sci. Policy Sustain. Dev.* **2008**, *50*, 12–25. [[CrossRef](#)]
129. Sathaye, J.; Shukla, P.R.; Ravindranath, N.H. Climate Change, Sustainable Development and India: Global and National Concerns. *Curr. Sci.* **2006**, *90*, 314–325.
130. Moriarty, P.; Honnery, D. Energy Efficiency or Conservation for Mitigating Climate Change? *Energies* **2019**, *12*, 3543. [[CrossRef](#)]
131. Shrader-Frechette, K. *What Will Work: Fighting Climate Change with Renewable Energy, Not Nuclear Power*; Oxford University Press: Cary, NC, USA, 2011; ISBN 978-0-19-979463-8.
132. Fräss-Ehrfeld, C. *Renewable Energy Sources: A Chance to Combat Climate Change*; Kluwer Law International B.V.: Alphen Aan Den Rijn, The Netherlands, 2009; ISBN 978-90-411-2870-6.
133. Kamal, S. *The Renewable Revolution: How We Can Fight Climate Change, Prevent Energy Wars, Revitalize the Economy and Transition to a Sustainable Future*; Routledge: Milton Park, UK, 2013; ISBN 978-1-136-54020-2.
134. Shor, R.J.; Ashok, P.; van Oort, E. Identifying the Gaps to Achieve the Goal of “Geothermal Anywhere”. *GRC Trans.* **2021**, *45*, 2128–2135.
135. Pearce, J.M. Photovoltaics—A Path to Sustainable Futures. *Futures* **2002**, *34*, 663–674. [[CrossRef](#)]
136. Bajpai, P.; Dash, V. Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation in Stand-Alone Applications: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16*, 2926–2939. [[CrossRef](#)]
137. Revesz, R.L.; Unel, B. The Future of Distributed Generation: Moving Past Net Metering. *Envtl. L. Rep. News Anal.* **2018**, *48*, 10719–10725.
138. Hayibo, K.S.; Pearce, J.M. A Review of the Value of Solar Methodology with a Case Study of the U.S. VOS. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *137*, 110599. [[CrossRef](#)]
139. Goldthau, A. *The Handbook of Global Energy Policy*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2016; ISBN 978-1-119-25069-2.
140. Baranzini, A.; Goldemberg, J.; Speck, S. A Future for Carbon Taxes. *Ecol. Econ.* **2000**, *32*, 395–412. [[CrossRef](#)]
141. Metcalf, G.E. Carbon Taxes in Theory and Practice. *Annu. Rev. Resour. Econ.* **2021**, *13*, 245–265. [[CrossRef](#)]
142. SUMNER, J.; BIRD, L.; DOBOS, H. Carbon Taxes: A Review of Experience and Policy Design Considerations. *Clim. Policy* **2011**, *11*, 922–943. [[CrossRef](#)]
143. Lal, R. Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change. *Geoderma* **2004**, *123*, 1–22. [[CrossRef](#)]
144. Blondeel, M.; Van de Graaf, T. Toward a Global Coal Mining Moratorium? A Comparative Analysis of Coal Mining Policies in the USA, China, India and Australia. *Clim. Chang.* **2018**, *150*, 89–101. [[CrossRef](#)]
145. Louie, E.P.; Pearce, J.M. Retraining Investment for U.S. Transition from Coal to Solar Photovoltaic Employment. *Energy Econ.* **2016**, *57*, 295–302. [[CrossRef](#)]
146. Pearce, J.M. Reducing the Threat of a Nuclear Iran with Photovoltaic Technology: The Generous Solar Option. *Peace Stud. J.* **2015**, *8*, 5.
147. Pearce, J.M. Strategic Investment in Open Hardware for National Security. *Technologies* **2022**, *10*, 53. [[CrossRef](#)]
148. Blumstein, C.; Krieg, B.; Schipper, L.; York, C. Overcoming Social and Institutional Barriers to Energy Conservation. *Energy* **1980**, *5*, 355–371. [[CrossRef](#)]
149. Watabe, A.; Leaver, J.; Shafiei, E.; Ishida, H. Life Cycle Emissions Assessment of Transition to Low-Carbon Vehicles in Japan: Combined Effects of Banning Fossil-Fueled Vehicles and Enhancing Green Hydrogen and Electricity. *Clean Technol. Environ. Policy* **2020**, *22*, 1775–1793. [[CrossRef](#)]
150. Plötz, P.; Axsen, J.; Funke, S.A.; Gnann, T. Designing Car Bans for Sustainable Transportation. *Nat. Sustain.* **2019**, *2*, 534–536. [[CrossRef](#)]

151. Pearce, J.M.; Sommerfeldt, N. Economics of Grid-Tied Solar Photovoltaic Systems Coupled to Heat Pumps: The Case of Northern Climates of the U.S. and Canada. *Energies* **2021**, *14*, 834. [CrossRef]
152. Cuff, M. Is It Time to Ban Gas Stoves? *New Sci.* **2023**, *257*, 17. [CrossRef]
153. Braungardt, S.; Tezak, B.; Rosenow, J.; Bürger, V. Banning Boilers: An Analysis of Existing Regulations to Phase out Fossil Fuel Heating in the EU. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2023**, *183*, 113442. [CrossRef]
154. Kolokotsa, D.; Rovas, D.; Kosmatopoulos, E.; Kalaitzakis, K. A Roadmap towards Intelligent Net Zero- and Positive-Energy Buildings. *Sol. Energy* **2011**, *85*, 3067–3084. [CrossRef]
155. Masson-Delmotte, V. Global Warming of 1.5 C. In *An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2018; p. 15.
156. Vidal, J. (Ed.) Environment Global Warming Causes 300,000 Deaths a Year, Says Kofi Annan Thinktank. *The Guardian*. 29 May 2009. Available online: <https://www.theguardian.com/environment/2009/may/29/1> (accessed on 24 June 2023).
157. Ingham, R. Climate: A Million Deaths a Year by 2030: Study. Available online: <https://phys.org/news/2010-12-climate-million-deaths-year.html> (accessed on 23 May 2023).
158. Roser, M. Data Review: How Many People Die from Air Pollution? 2021. Available online: <https://ourworldindata.org/data-review-air-pollution-deaths> (accessed on 24 June 2023).
159. Xu, Z.; Sheffield, P.E.; Hu, W.; Su, H.; Yu, W.; Qi, X.; Tong, S. Climate Change and Children’s Health—A Call for Research on What Works to Protect Children. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2012**, *9*, 3298–3316. [CrossRef] [PubMed]
160. Filiberto, D.; Wethington, E.; Pillemer, K.; Wells, N.; Wysocki, M.; Parise, J.T. Older People and Climate Change: Vulnerability and Health Effects. *Generations* **2009**, *33*, 19–25.
161. One Billion Children at ‘Extremely High Risk’ of the Impacts of the Climate Crisis—UNICEF. Available online: <https://www.unicef.org/press-releases/one-billion-children-extremely-high-risk-impacts-climate-crisis-unicef> (accessed on 23 May 2023).
162. Kodas, M. An Unprecedented Heat Wave in India and Pakistan Is Putting the Lives of More Than a Billion People at Risk. *Inside Climate News*, 7 May 2022.
163. Hewitt, J.E.; Ellis, J.I.; Thrush, S.F. Multiple Stressors, Nonlinear Effects and the Implications of Climate Change Impacts on Marine Coastal Ecosystems. *Glob. Chang. Biol.* **2016**, *22*, 2665–2675. [CrossRef]
164. Extreme Climate Risks: What Are the Worst-Case Scenarios? 2021. Available online: <https://2021.climatechangeefestival.zero.cam.ac.uk/events/extreme-climate-risks-what-are-worst-case-scenarios> (accessed on 24 June 2023).
165. *How a Population of 4.2 Billion Could Impact Africa by 2100: The Possible Economic, Demographic, and Geopolitical Outcomes*; The SAIS Review of International Affairs: Washington, DC, USA, 2019.
166. Ziegler, J. *Destruction Massive. Géopolitique de la Faim*; Le Seuil: Paris, France, 2011.
167. In World of Wealth, 9 Million People Die Every Year from Hunger, WFP Chief Tells Food System Summit | World Food Programme. Available online: <https://www.wfp.org/news/world-wealth-9-million-people-die-every-year-hunger-wfp-chief-tells-food-system-summit> (accessed on 24 June 2023).
168. Berners-Lee, M.; Kennelly, C.; Watson, R.; Hewitt, C.N. Current Global Food Production Is Sufficient to Meet Human Nutritional Needs in 2050 Provided There Is Radical Societal Adaptation. *Elem. Sci. Anthr.* **2018**, *6*, 52. [CrossRef]
169. Denkenberger, D.; Pearce, J.M. *Feeding Everyone No Matter What: Managing Food Security after Global Catastrophe*; Academic Press: London, UK, 2015.
170. Denkenberger, D.C.; Pearce, J.M. Feeding Everyone: Solving the Food Crisis in Event of Global Catastrophes That Kill Crops or Obscure the Sun. *Futures* **2015**, *72*, 57–68. [CrossRef]
171. Anderson, F.W.J.; Morton, S.U.; Naik, S.; Gebrian, B. Maternal Mortality and the Consequences on Infant and Child Survival in Rural Haiti. *Matern. Child Health J.* **2007**, *11*, 395–401. [CrossRef]
172. Pogge, T. World Poverty and Human Rights. *Ethics Int. Aff.* **2005**, *19*, 1–7. [CrossRef]
173. Pogge, T.W. Human Rights and Global Health: A Research Program. *Metaphilosophy* **2005**, *36*, 182–209. [CrossRef]
174. 35M People Dying from Hunger Worldwide: UN Official. Available online: <https://www.aa.com.tr/en/world/-35m-people-dying-from-hunger-worldwide-un-official/2352451> (accessed on 24 June 2023).
175. Population Pressure and the Climate Crisis. Available online: [https://www.biologicaldiversity.org/programs/population\\_and\\_sustainability/climate/](https://www.biologicaldiversity.org/programs/population_and_sustainability/climate/) (accessed on 24 June 2023).
176. Monbiot, G. The Banks Collapsed in 2008—And Our Food System Is about to Do the Same. *The Guardian*. 19 May 2022. Available online: <https://www.theguardian.com/commentisfree/2022/may/19/banks-collapsed-in-2008-food-system-same-producers-regulators> (accessed on 24 June 2023).
177. Cereal Secrets: The World’s Largest Grain Traders and Global Agriculture. Available online: <https://www.oxfam.org/en/research/cereal-secrets-worlds-largest-grain-traders-and-global-agriculture> (accessed on 24 June 2023).
178. UN Report: Pandemic Year Marked by Spike in World Hunger. Available online: <https://www.who.int/news/item/12-07-2021-un-report-pandemic-year-marked-by-spike-in-world-hunger> (accessed on 24 June 2023).
179. World Malaria Report 2021. Available online: <https://www.who.int/teams/global-malaria-programme/reports/world-malaria-report-2021> (accessed on 24 June 2023).
180. Hicks, D.; Bouey, J.; Wang, J. South Korea’s Extraordinary Fertility Decline. Available online: <https://www.rand.org/blog/2022/07/south-koreas-extraordinary-fertility-decline.html> (accessed on 18 July 2023).

181. U.S. Fertility Rate 1950–2023. Available online: <https://www.macrotrends.net/countries/USA/united-states/fertility-rate> (accessed on 18 July 2023).
182. Williams, A. To Breed or Not to Breed? *The New York Times*. 22 June 2023. Available online: <https://www.nytimes.com/2021/11/20/style/breed-children-climate-change.html> (accessed on 24 June 2023).

**Disclaimer/Publisher’s Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

# DIRITTI COMPARATI

Comparare i diritti fondamentali in Europa

## L'INSTALLAZIONE "EX ILVA" DOPO LA SENTENZA DELLA CORTE DI GIUSTIZIA UE: LE EMISSIONI CLIMALTERANTI TRA INTERESSE "STRATEGICO" E GENERAZIONI FUTURE

Posted on 27 Giugno 2024 by [Michele Carducci](#)

In data 25 giugno 2024, è stata pubblicata l'attesa decisione della Corte di giustizia della UE sui c.d. "decreti salva Ilva" ([Causa C-626/22](#)). Rispondendo a tre quesiti pregiudiziali del Tribunale per le imprese di Milano, dove pende la prima *class action* italiana contro il colosso siderurgico (per una ricostruzione, si v. F. Laus, [La saga Ilva all'attenzione della Corte di Giustizia](#)), il Giudice lussemburghese ha sostanzialmente bocciato, perché contrarie al diritto europeo, le «ripetute proroghe» italiane delle attività industriali (appunto i c.d. "decreti salva Ilva"), in presenza di «*individuati pericoli gravi e rilevanti per l'integrità dell'ambiente e della salute umana*», affermando non solo la doverosità del riesame dell'autorizzazione all'esercizio dell'installazione considerando, «*oltre alle sostanze inquinanti prevedibili tenuto conto della natura e della tipologia dell'attività industriale di cui trattasi, tutte quelle oggetto di emissioni scientificamente note come nocive che possono essere emesse dall'installazione interessata, comprese quelle generate da tale attività che non siano state valutate nel procedimento di autorizzazione iniziale*», ma anche la possibilità di sospensione delle attività, in assenza di siffatte

verifiche o di riscontri problematici per la tutela della salute e dell'ambiente.

È una sconfitta sonora su tutti e quattro i fronti delle difese dello Stato italiano e dei privati convenuti (Ilva Spa in Amministrazione Straordinaria, Acciaierie d'Italia Holding Spa, Acciaierie d'Italia Spa):

- quello di reputare l'attività privata "ex Ilva" sottratta agli obblighi europei, perché contenuti in direttive vincolanti solo gli Stati;
- quello dell'invocazione del bilanciamento, avallato dalla Corte costituzionale nella famosa decisione n. 85/2013, per giustificare che *«l'adozione delle norme speciali applicabili all'Ilva deriverebbe da una ponderazione tra gli interessi in gioco, vale a dire la protezione dell'ambiente, da un lato, e quella dell'occupazione, dall'altro»* (come si legge in sintesi al par. 129 della sentenza);
- quello dell'inquadramento riduzionistico della "protezione dell'ambiente" ai soli profili emissivi indicati in autorizzazione, senza alcuna considerazione del fatto che *«i grandi impianti di combustione contribuiscono considerevolmente all'emissione di sostanze inquinanti nell'atmosfera, che hanno gravi ripercussioni sulla salute umana»*, e non solo sull'ambiente, come pur dichiarato dalla normativa europea;
- quello consequenziale di escludere dai presupposti dei provvedimenti nazionali tanto il danno sanitario "reale" quanto gli impatti anche solo "potenziali" sulla salute umana, nonostante la condanna già ricevuta, sempre sulla vicenda "ex Ilva", dalla Corte europea dei diritti umani (sentenza "[Cordella et al.](#)" del 2019), in forza proprio di studi scientifici su quegli impatti reali e potenziali (sulla giurisprudenza della Corte si v. in questo blog [Greco](#)).

Il primo fronte di difesa è stato facilmente demolito dalla Corte di giustizia, in ragione del fatto che, nel diritto europeo, sono assimilabili a uno Stato membro anche gli *«organismi o entità, anche se disciplinati dal diritto privato, che sono soggetti all'autorità o al controllo di un'autorità pubblica o che sono stati incaricati da uno Stato membro di svolgere un compito di interesse pubblico»*, a maggior ragione se rubricato come "strategico" (par. 60 ss.). L' "interesse strategico nazionale", da formula magica cavalcata dal legislatore italiano per legittimare il regime

derogatorio del siderurgico tarantino, è degradato a *boomerang*, tradotto nel motivo della sottoposizione dell'impresa a tutti i vincoli europei.

Sugli altri tre fronti, il giudice unionale smantella l'uso aziendale del bilanciamento costituzionale, dai più abusato in quest'ultimo decennio di agonia tarantina (su cui, si v. un accenno in Carducci, [La fine dell'uso "aziendale" della Costituzione nella saga ex Ilva](#)). Tale bilanciamento, infatti, deve fare i conti con il parametro unitario degli artt. 35 e 37 della Carta dei diritti fondamentali dell'Unione europea. Se l'art. 35 stabilisce che deve essere garantito un «*livello elevato di protezione*» della salute umana, lo stesso criterio è indicato dall'art. 37, per la tutela dell'ambiente. Pertanto, il bilanciamento serve ad "elevare" la tutela di salute e ambiente, non ad annichirla o a sostituirla, come piattamente rivendicato dalla *vulgata* statale.

Per i grandi impianti di combustione che contribuiscono considerevolmente all'emissione di sostanze inquinanti, la "elevazione" della protezione si apprende dai paragrafi 109-122 della sentenza:

- è indispensabile un approccio di prevenzione,
- che valuti tutti gli «*effetti significativi delle emissioni sull'ambiente*»,
- tenendo conto «*di tutte le fonti di inquinanti e del loro effetto cumulativo*»,
- e che assuma come «*oggetto*», oltre alle «*sostanze inquinanti prevedibili tenuto conto della natura e della tipologia dell'attività industriale di cui trattasi*», anche «*tutte quelle oggetto di emissioni scientificamente note come nocive che possono essere emesse dall'installazione interessata, comprese quelle generate da tale attività che non siano state valutate nel procedimento di autorizzazione iniziale di tale installazione*».

La nitida distinzione tra "fonti di inquinanti", "sostanze", "emissioni" ed "effetti significativi delle emissioni sull'ambiente" è determinante. Essa non consiste in una classificazione tassativa o formalisticamente chiusa dentro il procedimento di autorizzazione iniziale. Diventa totalmente aperta, in nome appunto del duplice «*livello elevato di protezione*» della salute e dell'ambiente, a «*tutte oggetto di emissioni scientificamente note come nocive*».

È questa la più significativa novità della sentenza. Una clausola

onnicomprendensiva e includente è abilitata dalla Corte per favorire una lettura della questione delle emissioni industriali, da parte dei giudici nazionali, non più appiattita sul riduzionismo delle singole discipline di settore.

Ma allora quali sono «*tutte oggetto di emissioni scientificamente note come nocive*»?

La risposta non può che essere triplice, nella conformità con il riparto di competenze *ex artt. 4, 191 e 193 TFUE*. “Tutte” significa:

- quelle già previste come nocive, dunque dannose, dalle fonti europee, anche quando non riguardanti i parametri dello specifico provvedimento autorizzatorio;
- quelle che la scienza rende “note” come dannose;
- infine quelle che il diritto interno, in nome del medesimo duplice «*livello elevato di protezione*» della salute e dell’ambiente, contempla come dannose, in aggiunta (aggiunta ammessa dall’art. 193 TFUE) al diritto europeo.

Da quel “tutte”, quindi, non si può escludere nulla; neppure le “sostanze” oggetto di emissioni climalteranti, ovvero i gas serra (in primis, CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>)

Il dato scandisce una constatazione significativa per il prosieguo del contenzioso davanti al Tribunale di Milano, dove i ricorrenti hanno lamentato – tra gli altri diritti lesi – quello umano al clima stabile e sicuro (come ricordato dalla stessa Corte di giustizia nel suo paragrafo 37), vincolando di conseguenza il giudice, in forza dell’art. 112 Cod. proc. civ., a esprimersi in merito.

I gas serra industriali sono sostanze “nocive” all’ambiente e alla salute.

Lo dice inequivocabilmente la scienza, con i [Report](#) dell’IPCC, dato che essi alterano la loro concentrazione atmosferica, destabilizzando il sistema climatico e proiettandolo oltre le soglie di sicurezza, fissate dagli Stati nell’art. 2 dell’Accordo di Parigi del 2015.

Lo dicono gli Stati, che alla [COP28](#) del 2023 si sono impegnati ad abbandonarli.

Lo ammette anche il diritto europeo, dopo l’introduzione del principio *DNSH (Do No Significant Harm)*, riaggiornato dai Regolamenti UE nn.

2020/852 e 2021/241, proprio in funzione della lotta al cambiamento climatico antropogenico, spiegando che il carattere "significativo" dell'effetto emissivo deve sempre essere rapportato anche «*al fine di individuare il grado di ecosostenibilità di un investimento*» (come quelli di cui ha bisogno l'installazione tarantina), ai criteri elencati dall'art. 3 del cit. Reg. 853.

Ma lo conferma pure l'ordinamento italiano, in particolare con la "*Guida operativa per il rispetto del principio di non arrecare danno significativo all'ambiente*", adottata dalla Presidenza del Consiglio e allegata alla Circolare n. 22 del 14 maggio 2024, dove le fonti fossili sono escluse dalla compatibilità con il suddetto principio *DNSH*.

E lo fa proprio persino la *Soft Law* delle [Linee Guida OCSE](#), applicabili alle imprese come quelle di Taranto in virtù del c.d. "[nexus Stato-Imprese](#)" stabilito dal *Piano d'azione nazionale su impresa e diritti umani*, con l'aggiornamento 2023 della *Due Diligence* sugli impatti climatici negativi, anche solo potenziali, parametrati agli scenari di sicurezza dell'art. 2 dell'Accordo di Parigi.

Insomma, la valutazione preventiva dell'installazione "ex Ilva" o sarà olistica o non sarà; e, nell'essere olistica, non potrà non essere anche climatica.

Non esistono alternative a questo sbocco. Dopo questa sentenza, un esito differente risulterebbe formalmente illegittimo e inadeguato: illegittimo perché antieuropeo, visto che, in nome dell'attuazione del diritto europeo a garanzia della "elevata protezione" di salute e ambiente, si pretenderebbe di escludere le "sostanze" climalteranti, esplicito ostacolo di tale garanzia; inadeguato perché materialmente schizofrenico, come, tra l'altro, fatto presente da una recente, importante decisione della Corte suprema del Regno Unito, nel caso "*R. (Appellant) v Surrey County Council and others*" del 20 giugno 2024, pretendendo di considerare settoriali impatti ambientali e sanitari nell'omissione delle "sostanze" destabilizzanti il sistema climatico che li include.

Invero, sarebbe pure incostituzionale e in violazione della CEDU, se solo si pone attenzione a due importanti sentenze, quasi coeve a quella della

Corte di Lussemburgo:

- la decisione della Corte costituzionale n. 105/2024, che affida a soggetti pubblici e privati il “mandato” di coniugare i riformati artt. 9 e 41 Cost. in prospettiva intergenerazionale per non «*recare danno alla salute e all’ambiente*» (in merito, rinvio a Carducci, [Il duplice “mandato” ambientale](#));
- il famoso caso “climatico” *Verein KlimaSeniorinnen* (ricorso n. [53600/20](#)), che nella medesima proiezione colloca proprio quell’art. 8 CEDU, già utilizzato nel citato caso “*Cordella*”, nella situazione di fatto dell’emergenza climatica in corso (cfr. per una sintesi, F. Gallarati, [Il costituzionalismo climatico dopo KlimaSeniorinnen](#) e in questo blog [Guarna Assanti](#)).

Il “combinato disposto” delle tre sentenze supreme (Corte UE, Corte EDU e Corte costituzionale) è convergente: se davvero si deve decidere sul futuro dell’installazione “*ex Ilva*” in nome della “elevata protezione” della salute e dell’ambiente, quel futuro non può estromettere gli impatti climatici e l’interesse anche delle generazioni future.

# La sentenza europea sull'ex Ilva mette fine alle “deroghe” all’italiana

[iacostituzione.info/index.php/2024/07/01/la-sentenza-europea-sullex-ilva-mette-fine-alle-deroghe-allitaliana/](https://iacostituzione.info/index.php/2024/07/01/la-sentenza-europea-sullex-ilva-mette-fine-alle-deroghe-allitaliana/)

1 Luglio 2024

di **Michele Carducci**

La sentenza della Corte di giustizia sull’interpretazione della Direttiva europea in materia di emissioni dei grandi impianti industriali (c.d. IED), resa nella causa italiana in tema di ripetute proroghe dell’installazione ex Ilva (Causa C-626/22), presenta due caratteri di novità, da non sottovalutare nella loro portata futura.



In primo luogo, il suo contenuto ermeneutico non produrrà conseguenze solo sul caso italiano. Trattandosi di sentenza su rinvio pregiudiziale per l’interpretazione delle fonti europee, le indicazioni fornite dalla Corte finiranno col coinvolgere d’ora in poi le sorti di ben 52.000 impianti inquinanti dell’UE (cfr. Radisson, *Les installations classées IED doivent être suspendues en cas de graves dangers*).

In secondo luogo, tali indicazioni produrranno effetti applicativi irreversibili su quattro fronti:

- gli artt. 35 e 37 della Carta dei diritti fondamentali della UE (in materia di elevato livello di tutela della salute e dell’ambiente) rappresenteranno il parametro insostituibile di applicazione della Direttiva, sicché essi dovranno essere sempre interpretati congiuntamente, al fine di rendere legittime autorizzazioni e revisioni delle attività industriali;
- in ragione di questo duplice parametro in “combinato disposto”, sussiste a livello europeo un principio in forza del quale le installazioni che mettono gravemente a rischio la salute umana dovranno essere fermate, in attesa della soluzione dei problemi;
- sul piano del metodo, tale principio si tradurrà, sempre, comunque e ovunque, in una valutazione preventiva degli impatti dell’attività industriale sulla salute umana, proprio al fine di promuovere un’analisi integrata del rischio, conforme ai citati articoli della Carta europea dei diritti;
- l’analisi integrata del rischio dovrà a sua volta optare per un’interpretazione estensiva e inclusiva della nozione di emissioni industriali “nocive”, non appiattita alle mere elencazioni formali, perché aperta alle acquisizioni della scienza come di altre fonti e parametrata ai contesti fattuali di riferimento.

In ossequio a queste quattro indicazioni generali, le decisioni italiane sull'ex Ilva non potranno più seguire il canovaccio di questo ultimo decennio.

Dal 2013 in poi, la politica italiana – con qualche avallo della cultura giuridica – si è nutrita di una doppia retorica apparentemente costituzionale:

- quella della “strategicità” solo “nazionale” dell’impianto, tale da giustificarne costanti deroghe normative esclusivamente domestiche;
- quella dell’imperituro bilanciamento tra salute e attività produttiva, in nome della formula che “nessun diritto è tiranno”, impressa, com’è noto, dalla sentenza costituzionale n. 85/2013.

Entrambe le retoriche sono state smantellate dalla sentenza di Lussemburgo. Infatti, quest’ultima, con i quattro passaggi prima sintetizzati, ha fissato un itinerario metodologico di portata generale, come tale superabile solo in nome di eventuali “controlimiti” costituzionali nazionali, capaci di legittimarne la non utilizzazione.

L’Italia, però, questi “controlimiti” non li ha mai invocati. Ha fatto tutt’altro: ha disapplicato il diritto europeo in nome non della Costituzione, ma di altro.

Da un lato, ha coniato la parola magica “interesse strategico nazionale”, sconosciuta al lessico costituzionale e semanticamente incomprensibile nella sua portata generale (anche perché, di fatto, riferita solo a Ilva), sbandierandola come legittima *ratio* per non considerare obbligatoria la valutazione sanitaria preventiva, nonostante non solo le sollecitazioni dei cittadini e di alcune istituzioni locali, ma soprattutto la notorietà, mai scientificamente confutata, della non tollerabilità degli effetti nocivi dell’impianto sulla salute umana. Ha perseverato su questa retorica, anche dopo che Rapporto speciale ONU, redatto per la 49<sup>a</sup> sessione su “*Promozione e protezione di tutti i diritti umani, civili, politici, economici, sociali e culturali, incluso il diritto allo sviluppo*”, ha classificato Taranto «*zona di sacrificio*» di quei diritti (quindi non solo di quello alla salute) e «*macchia sulla coscienza collettiva dell’umanità*» (cfr. F. Bianchi, *Per le Nazioni Unite Taranto è una “zona di sacrificio” dei diritti umani*).

Dall’altro, ha utilizzato la formula sui diritti non “tiranni” – frutto della citata sentenza costituzionale del 2013 – per considerare necessario, in nome del diritto al lavoro, l’aumento della produzione di acciaio, negando sfacciatamente il suo comprovato nesso eziologico con la qualità della vita dei tarantini (e non solo).

Su questi due pilastri, lo Stato italiano ha pervicacemente impostato la propria difesa davanti alla Corte di giustizia. Nessuno dei due, tuttavia, ha retto alla prova della compatibilità con gli artt. 35 e 37 della Carta europea. Nessuno dei due reggerà più. La stagione delle “deroghe” all’italiana è finita.

Come si potrà continuare a negare il diritto alla salute, quando il contesto fattuale di riferimento per l'applicazione dell'interpretazione europea è un luogo internazionalmente denunciato come «*zona di sacrificio*» di tutti i diritti umani e, per questo, «*macchia sulla coscienza collettiva dell'umanità*»? Quale valutazione sanitaria e ambientale integrata potrà ignorare siffatta caratteristica negativa?

Del resto, a mettere una pietra tombale alle “deroghe” all'italiana è stata pure la Costituzione, con i riformati artt. 9 e 41, la cui applicazione concreta, come chiarito dalla recente sentenza della Corte n. 105/2024, dovrà d'ora in poi tener conto anche dell'interesse delle generazioni future, al fine sempre di non recare danno alla salute e all'ambiente.

Per l'Italia, il contesto fattuale di riferimento dell'applicazione della Direttiva si è trasformato da contingente in intergenerazionale: una svolta immodificabile.

Pertanto, se davvero un “controlimite” costituzionale si vorrà richiamare al cospetto dell'interpretazione fornita dalla Corte di Lussemburgo, questo potrà e dovrà essere solo migliorativo e non certo “derogatorio”, integrando i quattro effetti irreversibili della decisione europea con il nuovo “mandato” (come denominato dalla Corte costituzionale) della valutazione intergenerazionale del rischio nella specifica ed eccezionale situazione di «*zona di sacrificio*» dei diritti umani dei tarantini.

C'è da augurarsi che il Tribunale di Milano, da cui è scaturito il procedimento pregiudiziale a Strasburgo, voglia tener conto di questo quadro fattuale intergenerazionale, nel dar seguito alle domande dei ricorrenti. Diversamente agendo, replicherebbe negligenzemente un'ennesima “deroga” all'italiana, questa volta, però, non più, o non solo, del diritto europeo ma della stessa Costituzione italiana, riformata per migliorare la vita dei consociati nel presente e nel futuro, non per stigmatizzarla come “tiranna” verso le (antieuropee) “strategie” dello Stato.

# Catalogo aperto delle emissioni pericolose e tutela della persona tra diritto interno ed europeo

[iacostituzione.info/index.php/2024/07/01/catalogo-aperto-delle-emissioni-pericolose-e-tutela-della-persona-tra-diritto-interno-ed-europeo/](https://iacostituzione.info/index.php/2024/07/01/catalogo-aperto-delle-emissioni-pericolose-e-tutela-della-persona-tra-diritto-interno-ed-europeo/)

1 Luglio 2024

## laCostituzione.info

di **Giorgio Trivi**

Il 25 giugno 2024, è stata pubblicata la decisione della Corte di giustizia della UE sui c.d. “decreti salva Ilva” (Causa C-626/22). Si tratta di una sentenza importantissima per il futuro dell’impianto siderurgico tarantino, soprattutto perché essa stabilisce un principio di diritto, non più eludibile: gli artt. 35 e 37 della Carta dei diritti fondamentali della UE

(riguardanti rispettivamente la “elevata protezione” della salute e dell’ambiente) vanno applicati congiuntamente, affinché qualsiasi valutazione ambientale ricomprenda sempre gli impatti sulla salute umana, indipendentemente dal tipo di attività in esame.

Questa novità, proprio perché in punto di diritto sulle due disposizioni della Carta europea dei diritti, è destinata a non arrestarsi al solo contesto che ha generato la decisione (su cui si v. F. Laus, La saga Ilva all’attenzione della Corte di Giustizia). Il dato, del resto, è confermato da un altro passaggio che apre scenari inediti nel campo della tutela ambientale come tutela della salute umana. Infatti, il giudice di Lussemburgo spiega che «*oltre alle sostanze*



*inquinanti prevedibili tenuto conto della natura e della tipologia dell'attività industriale di cui trattasi», la valutazione combinata di ambiente e salute – legittimata dai citati artt. 35 e 37 Carta europea – deve altresì ricomprendere, in una prospettiva di prevenzione e non di riparazione, «tutte quelle oggetto di emissioni scientificamente note come nocive che possono essere emesse dall'installazione interessata, comprese quelle generate da tale attività che non siano state valutate nel procedimento di autorizzazione iniziale».*

In pratica, il catalogo delle emissioni pericolose per la salute umana diventa aperto e fondato su qualificazioni di “nocività” di carattere non più, o non solo, “normativo” ma anche “scientifico”, orientando di riflesso, sulla base appunto delle conoscenze scientifiche, la valutazione dei singoli casi di impatto. Questa evoluzione del tema delle emissioni a tutela della persona umana è una conquista recente non solo del diritto europeo.

Nel contesto italiano, essa ha contraddistinto l'applicazione dell'art. 844 Cod. civ. (si v., in proposito, C. Lazzaro, *Le immissioni nelle rinnovate logiche della responsabilità civile*, Torino, 2021). Infatti, la disposizione civilistica letteralmente prevede che «*il proprietario di un fondo non può impedire le immissioni ... derivanti dal fondo del vicino, se non superano la normale tollerabilità, avuto anche riguardo alla condizione dei luoghi*», aggiungendo altresì che «*nell'applicare questa norma l'autorità giudiziaria deve contemperare le esigenze della produzione con le ragioni della proprietà. Può tener conto della priorità di un determinato uso*». La sua formula letterale venne superata già dalla storica sentenza della Cass. Civ. SS.UU. 6 ottobre 1979 n. 5172 (consultabile in *Il Foro Italiano*, 1979, parte prima, cc. 2302-2307, con nota di A. Lener), perché letta come fonte di tutela, invece che del “fondo”, della salute e del diritto all'ambiente salubre delle persone ivi residenti. Solo più tardi, però, essa ha abilitato un percorso ermeneutico completamente nuovo, scandito dai seguenti passaggi:

– l'art. 844 Cod. civ. è da leggere in combinato disposto con l'art. 32 Cost. e con l'art. 8 CEDU;

– esso contiene una “formula aperta”, quella di «*normale tollerabilità*», che abilita a operazioni giudiziali di “contemperamento” non fra produzione e proprietà, bensì fra diritti della persona ed esigenze della produzione;

– dove le formule normative «*condizioni dei luoghi*» e «*priorità di un determinato uso*» vanno lette congiuntamente in termini di “situazione ambientale” che responsabilizza parimenti persone e produttori;

– sicché eventuali danni da emissioni potranno essere risarciti anche se nei limiti di legge, in ragione appunto della “situazione ambientale”;

– legittimando, allo stesso modo, interventi di prevenzione, e non solo di risarcimento, ove la “situazione ambientale” verta in una condizione di pericolo o emergenza.

Alla luce di questa trasformazione *pro persona* del tema emissivo, la dottrina civilistica ha intravisto l'insorgenza di un "dovere positivo di protezione" consistente in uno "standard", materiale e non formale perché scientificamente accertabile, di "*alterum non laedere*" attraverso attività di precauzione e prevenzione (S. Ciccarello, *Dovere di protezione d valore della persona*, Milano, 1988); "standard" non esplicitato in Costituzione, ma da esso desumibile in virtù del "principio di massima attuazione della Costituzione" (P. Perlingieri, *Salvatore Pugliatti e il «principio della massima attuazione della Costituzione»*, in *Rass. Dir. Civ.*, 1996, 807 ss.).

Le SS.UU. della Corte di cassazione hanno fatto proprio questo orientamento di "protezione preventiva" in due importanti decisioni, che di fatto evocano la struttura argomentativa della citata decisione europea sui "decreti salva Ilva".

La prima è la decisione 27 luglio 2022 n. 23436. In essa si legge che il giudice ordinario può condannare la pubblica amministrazione non solo al risarcimento dei danni, per emissioni già prodotte, ma anche a un *facere* di tutela delle persone su quelle future, dato che «*alla P.A. è riconosciuta una discrezionalità attiva, attinente cioè alla scelta delle misure più idonee, non anche la discrezionalità nel non agire, perché quest'ultima è incompatibile con la natura inviolabile del diritto fondamentale [alla salute], soprattutto quando sia a rischio il nucleo essenziale del diritto medesimo*». Ne deriva che «*l'inerzia della P.A. ... per la mancata adozione delle misure adeguate a eliminare o a ridurre nei limiti della soglia di tollerabilità le immissioni inquinanti si risolve in una violazione del principio generale del neminem laedere*».

La seconda decisione è quella del 23 febbraio 2023 n. 5668. In essa si qualificano come «materia analoga» le emissioni disciplinate appunto dall'art. 844 Cod. civ e quelle previste da qualsiasi altra fonte dell'ordinamento, al fine appunto di stabilire uno "standard" comune di condotta preventiva e precauzionale, su cui ha titolo a intervenire il giudice ordinario anche nei confronti del potere pubblico, condannandolo a provvedere, con tutte le misure adeguate, all'eliminazione o alla riduzione nei limiti della soglia di «*tollerabilità*» dell'emissione controversa, in nome della salute umana, e non solo dell'ambiente, e qualificando la «*tollerabilità*» sempre in funzione delle situazioni fattuali e non delle norme.

Ecco allora che, come il giudice europeo invita, in forza degli art. 35 e 37 della Carta europea dei diritti, a prevenire la "nocività" delle emissioni in una prospettiva di catalogo aperto, alla luce anche delle acquisizioni scientifiche per la "elevata protezione" di salute e ambiente, così il giudice italiano approda alla lettura della "tollerabilità" delle emissioni in una rappresentazione analoga di valutazione, altrettanto preventiva, della condotta materiale adeguata ai contesti fattuali, ai fini sempre della medesima "elevata protezione".

In definitiva, il tema delle emissioni è stato irreversibilmente emancipato dalle interpretazioni formalistiche della mera conformità alle elencazioni tassative, con le altrettanto tassative soglie prestabilite di pericolosità, per aprirsi alla dimensione, scientificamente orientata, della loro adeguatezza per la effettiva “elevata protezione” della persona umana nelle situazioni ambientali concrete di vita.

È una conclusione importante nell’era dell’emergenza climatica e ambientale, perché fa finalmente proprio un insegnamento, che la comunità scientifica – per lungo tempo inascoltata – aveva con forza richiamato all’attenzione dei decisori politici: ragionare di “pericolosità” e “tollerabilità” di qualsiasi emissione, in base alle situazioni fattuali, non in base a indicazioni generali e astratte (cfr. il monito generale di T. Lenton *et al.*, *Integrating tipping points into climate impact assessments*, 2013).

di **Giorgio Trivi**

Il 25 giugno 2024, è stata pubblicata la decisione della Corte di giustizia della UE sui c.d. “decreti salva Ilva” (Causa C-626/22).

Si tratta di una sentenza importantissima per il futuro dell’impianto siderurgico tarantino, soprattutto perché essa stabilisce un principio di diritto, non più eludibile: gli artt. 35 e 37 della Carta dei diritti fondamentali della UE (riguardanti rispettivamente la “elevata protezione” della salute e dell’ambiente) vanno applicati congiuntamente, affinché qualsiasi valutazione ambientale ricomprenda sempre gli impatti sulla salute umana, indipendentemente dal tipo di attività in esame.

Questa novità, proprio perché in punto di diritto sulle due disposizioni della Carta europea dei diritti, è destinata a non arrestarsi al solo contesto che ha generato la decisione (su cui si v. F. Laus, La saga Ilva all’attenzione della Corte di Giustizia).

Il dato, del resto, è confermato da un altro passaggio che apre scenari inediti nel campo della tutela ambientale come tutela della salute umana. Infatti, il giudice di Lussemburgo spiega che «*oltre alle sostanze inquinanti prevedibili tenuto conto della natura e della tipologia dell’attività industriale di cui trattasi*», la valutazione combinata di ambiente e salute – legittimata dai citati artt. 35 e 37 Carta europea – deve altresì ricomprendere, in una prospettiva di prevenzione e non di riparazione, «*tutte quelle oggetto di emissioni*

*scientificamente note come nocive che possono essere emesse dall'installazione interessata, comprese quelle generate da tale attività che non siano state valutate nel procedimento di autorizzazione iniziale».*

In pratica, il catalogo delle emissioni pericolose per la salute umana diventa aperto e fondato su qualificazioni di “nocività” di carattere non più, o non solo, “normativo” ma anche “scientifico”, orientando di riflesso, sulla base appunto delle conoscenze scientifiche, la valutazione dei singoli casi di impatto.

Questa evoluzione del tema delle emissioni a tutela della persona umana è una conquista recente non solo del diritto europeo.

Nel contesto italiano, essa ha contraddistinto l'applicazione dell'art. 844 Cod. civ. (si v., in proposito, C. Lazzaro, *Le immissioni nelle rinnovate logiche della responsabilità civile*, Torino, 2021). Infatti, la disposizione civilistica letteralmente prevede che *«il proprietario di un fondo non può impedire le immissioni ... derivanti dal fondo del vicino, se non superano la normale tollerabilità, avuto anche riguardo alla condizione dei luoghi»*, aggiungendo altresì che *«nell'applicare questa norma l'autorità giudiziaria deve contemperare le esigenze della produzione con le ragioni della proprietà. Può tener conto della priorità di un determinato uso»*. La sua formula letterale venne superata già dalla storica sentenza della Cass. Civ. SS.UU. 6 ottobre 1979 n. 5172 (consultabile in *Il Foro Italiano*, 1979, parte prima, cc. 2302-2307, con nota di A. Lener), perché letta come fonte di tutela, invece che del “fondo”, della salute e del diritto all'ambiente salubre delle persone ivi residenti. Solo più tardi, però, essa ha abilitato un percorso ermeneutico completamente nuovo, scandito dai seguenti passaggi:

– l'art. 844 Cod. civ. è da leggere in combinato disposto con l'art. 32 Cost. e con l'art. 8 CEDU;

– esso contiene una “formula aperta”, quella di *«normale tollerabilità»*, che abilita a operazioni giudiziali di “contemperamento” non fra produzione e proprietà, bensì fra diritti della persona ed esigenze della produzione;

– dove le formule normative *«condizioni dei luoghi»* e *«priorità di un determinato uso»* vanno lette congiuntamente in termini di “situazione ambientale” che responsabilizza parimenti persone e produttori;

– sicché eventuali danni da emissioni potranno essere risarciti anche se nei limiti di legge, in ragione appunto della “situazione ambientale”;

– legittimando, allo stesso modo, interventi di prevenzione, e non solo di risarcimento, ove la “situazione ambientale” verta in una condizione di pericolo o emergenza.

Alla luce di questa trasformazione *pro persona* del tema emissivo, la dottrina civilistica ha intravisto l'insorgenza di un "dovere positivo di protezione" consistente in uno "standard", materiale e non formale perché scientificamente accertabile, di "*alterum non laedere*" attraverso attività di precauzione e prevenzione (S. Ciccarello, *Dovere di protezione d valore della persona*, Milano, 1988); "standard" non esplicitato in Costituzione, ma da esso desumibile in virtù del "principio di massima attuazione della Costituzione" (P. Perlingieri, *Salvatore Pugliatti e il «principio della massima attuazione della Costituzione»*, in *Rass. Dir. Civ.*, 1996, 807 ss.).

Le SS.UU. della Corte di cassazione hanno fatto proprio questo orientamento di "protezione preventiva" in due importanti decisioni, che di fatto evocano la struttura argomentativa della citata decisione europea sui "decreti salva Ilva".

La prima è la decisione 27 luglio 2022 n. 23436. In essa si legge che il giudice ordinario può condannare la pubblica amministrazione non solo al risarcimento dei danni, per emissioni già prodotte, ma anche a un *facere* di tutela delle persone su quelle future, dato che «*alla P.A. è riconosciuta una discrezionalità attiva, attinente cioè alla scelta delle misure più idonee, non anche la discrezionalità nel non agire, perché quest'ultima è incompatibile con la natura inviolabile del diritto fondamentale [alla salute], soprattutto quando sia a rischio il nucleo essenziale del diritto medesimo*». Ne deriva che «*l'inerzia della P.A. ... per la mancata adozione delle misure adeguate a eliminare o a ridurre nei limiti della soglia di tollerabilità le immissioni inquinanti si risolve in una violazione del principio generale del neminem laedere*».

La seconda decisione è quella del 23 febbraio 2023 n. 5668. In essa si qualificano come «materia analoga» le emissioni disciplinate appunto dall'art. 844 Cod. civ e quelle previste da qualsiasi altra fonte dell'ordinamento, al fine appunto di stabilire uno "standard" comune di condotta preventiva e precauzionale, su cui ha titolo a intervenire il giudice ordinario anche nei confronti del potere pubblico, condannandolo a provvedere, con tutte le misure adeguate, all'eliminazione o alla riduzione nei limiti della soglia di «*tollerabilità*» dell'emissione controversa, in nome della salute umana, e non solo dell'ambiente, e qualificando la «*tollerabilità*» sempre in funzione delle situazioni fattuali e non delle norme.

Ecco allora che, come il giudice europeo invita, in forza degli art. 35 e 37 della Carta europea dei diritti, a prevenire la "nocività" delle emissioni in una prospettiva di catalogo

aperto, alla luce anche delle acquisizioni scientifiche per la “elevata protezione” di salute e ambiente, così il giudice italiano approda alla lettura della “tollerabilità” delle emissioni in una rappresentazione analoga di valutazione, altrettanto preventiva, della condotta materiale adeguata ai contesti fattuali, ai fini sempre della medesima “elevata protezione”.

In definitiva, il tema delle emissioni è stato irreversibilmente emancipato dalle interpretazioni formalistiche della mera conformità alle elencazioni tassative, con le altrettanto tassative soglie prestabilite di pericolosità, per aprirsi alla dimensione, scientificamente orientata, della loro adeguatezza per la effettiva “elevata protezione” della persona umana nelle situazioni ambientali concrete di vita.

È una conclusione importante nell’era dell’emergenza climatica e ambientale, perché fa finalmente proprio un insegnamento, che la comunità scientifica – per lungo tempo inascoltata – aveva con forza richiamato all’attenzione dei decisori politici: ragionare di “pericolosità” e “tollerabilità” di qualsiasi emissione, in base alle situazioni fattuali, non in base a indicazioni generali e astratte (cfr. il monito generale di T. Lenton *et al.*, *Integrating tipping points into climate impact assessments*, 2013).

## Cambiamento climatico e inquinamento, alla luce di sei recenti decisioni giudiziali: l’analogia come analisi dei “co-benefici” della mitigazione climatica e attuazione del principio europeo di “integrazione”

di Giorgio Trivi

1. Inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici sono due facce della stessa medaglia, nel senso di rappresentare fenomeni antropogenici strettamente interconnessi e interagenti. Dal punto di vista fattuale, questa interconnessione opera su quattro campi di interazione:

- sorgenti di sostanze inquinanti sono allo stesso tempo sorgenti di sostanze climalteranti;
- molti inquinanti sono in grado di influenzare il bilancio radiativo del pianeta, con implicazioni climalteranti di riscaldamento della temperatura del pianeta;
- i cambiamenti climatici influenzano la qualità dell’aria, incidendo sulle condizioni meteorologiche che influenzano dispersione e accumulo di inquinanti;
- entrambi dipendono direttamente e principalmente dall’utilizzo dei combustibili fossili<sup>1</sup>.

Questa verità fattuale implica conseguenze giuridiche significative, rese ora evidenti da sei recenti decisioni giudiziali: due internazionali (ITLOS e Corte CEDU) e quattro nazionali (Corte di cassazione, Consiglio di Stato e Corte costituzionale). Le prime cinque sono analizzate a seguire, mentre l’ultima sarà citata in conclusione.

2. La prima decisione è data dall’Opinione consultiva del Tribunale Internazionale del Mare (ITLOS), n. 31 del 24 maggio 2024<sup>2</sup>. Secondo questo giudice, gli Stati sono soggetti a un rigoroso obbligo di “*Due Diligence*” nel prevenire, ridurre e controllare l’inquinamento (nello specifico, marino), attraverso l’intervento sulle emissioni antropogeniche di gas serra, al fine di evitare

---

<sup>1</sup> Per una sintesi divulgativa, cfr. C. Mangia *et al.*, *Crisi climatica e inquinamento atmosferico*, in *Ithaca: Viaggio nella Scienza*, 15, 2020, 57-68.

<sup>2</sup> A. Macchia, *Diving into climate change: ITLOS’ Advisory Opinion in Case No. 31*, in *www.diritticomparati.it*, 17 giugno 2024.

conseguenziali effetti dannosi irreversibili. Questo significa che la mitigazione climatica è da considerarsi funzionale al controllo non solo dell'aumento della temperatura media globale, da cui derivano catene causali di specifici eventi e processi dannosi (dagli eventi meteorologici estremi alla siccità ecc...), ma anche dell'inquinamento, che altri tipi di danni, sia all'ambiente che alla salute umana, attiva.

La seconda decisione giudiziale significativa è offerta dalle Sezioni Unite dalla Corte di cassazione civile, con l'ordinanza 23 febbraio 2023 n. 5668, in tema sempre di inquinamento (nello specifico, atmosferico). In questo provvedimento, si riconosce che il diritto alla salute non tollera mai compressioni neppure da parte dei pubblici poteri, sicché la giurisdizione a sua tutela spetta al giudice ordinario. Nel contempo, però, attraverso il ricorso all'analogia con le "immissioni intollerabili", regolate dall'art. 844 Cod. civ. (in particolare, in tema di odori e polveri, con Cass. civ. sentenza 23436/2022, e di disturbi acustici provenienti da aree pubbliche, con Cass. civ. , ordinanza 21993/ 2020), si puntualizza che l'attività inquinante resta sempre nociva, anche se svolta in conformità a provvedimenti autorizzativi della pubblica amministrazione, allorquando denoti un comportamento materiale dei poteri pubblici, negligente nel considerare tutti i fattori incidenti sull'inquinamento medesimo e, dunque, ometta le cautele necessarie per evitare danni alla salute umana. Tra queste "cautele", per le quattro interazioni fattuali prima riscontrate e come confermato ora dall'ITLOS, non può non esservi la mitigazione climatica. Di conseguenza, anche le emissioni climalteranti sono "nocive" perché comunque "inquinanti". Da tale angolatura, il ragionamento italiano evoca un passaggio dell'ordinanza del Tribunale costituzionale federale tedesco nel caso c.d. "Neubauer" (24 marzo 2021), precisamente al paragrafo 9, dove si spiega che la tutela della vita e dell'integrità fisica comprende la protezione dall'inquinamento ambientale, indipendentemente dalle circostanze che lo determinino, per concludere appunto che il cambiamento climatico è una di queste circostanze.

La terza decisione è di poco successiva e proviene dal Consiglio di Stato (Cons. Stato, Sez. IV 31 maggio 2023 n. 5377). Essa è importante dal punto di vista metodologico, perché descrive in che cosa debba consistere il comportamento non negligente del potere pubblico. Il responso fornito è il seguente: anche se dovessero sussistere incertezze sulla nocività dell'inquinamento e sulle sue cause, l'intervento preventivo dell'autorità pubblica è sempre doveroso, in quanto non può attendere l'inconfutabile prova scientifica degli effetti dannosi, ma «deve essere predisposto sulla base di attendibili valutazioni di semplice possibilità/probabilità del rischio, "attualmente" e "progressivamente" disponibili», sicché «al concetto di precauzione è connaturata un'intrinseca

funzione di anticipazione della soglia di intervento dell'azione preventiva». Com'è noto, la mitigazione climatica consiste di per sé in un'intrinseca funzione di anticipazione della soglia di intervento dell'azione preventiva, sicché il ricorso a essa risulta necessario anche ove si dubitasse delle quattro interazioni fattuali, prima scansionate.

La quarta decisione proviene dalla Corte europea dei diritti umani, con il noto caso *Verein KlimaSeniorinnen*, del 9 aprile 2024 (ricorso n. 53600/20). Questa sentenza, tra le tante novità contenute, traccia un parallelo tra inquinamento ambientale, oggetto di consolidata giurisprudenza di tutela ai sensi degli artt. 2 e 8 CEDU, e cambiamento climatico, per affermare che la mitigazione climatica deve essere impostata dagli Stati ai fini della riduzione tanto delle emissioni climalteranti quanto degli effetti della climalterazione, tra cui rientra appunto l'inquinamento.

Tuttavia, è con la quinta decisione da citare, la sentenza della Corte costituzionale del 13 giugno 2024 n.105/2024, che il cerchio si chiude. La Consulta, inquadrando per la prima volta in modo completo tutte le implicazioni dei riformati artt. 9 e 41 della Costituzione, ricorda che esiste un principio di integrazione della prevenzione ambientale con la riduzione delle emissioni nell'aria, puntualizzando che tale principio deve operare nell'interesse anche delle generazioni future. Il che significa, alla luce sempre delle quattro interazioni fattuali evidenziate, che la lotta all'inquinamento è azione di tutela intergenerazionale al pari della lotta al cambiamento climatico.

3. Per concludere, questa giurisprudenza ci consegna due acquisizioni di giudizio, non più eludibili: una di carattere fattuale e l'altra di carattere giuridico.

Quella di carattere fattuale dipende direttamente dalle quattro interazioni, indicate nel primo paragrafo. Come detto, cambiamento climatico e inquinamento sono le due facce della stessa medaglia: l'agire sull'una non può prescindere dall'agire sull'altra; la separazione – fattuale e giuridica – tra emissioni inquinanti ed emissioni climalteranti non ha alcun senso. Al contrario, procedere contemporaneamente su entrambe, attraverso prioritariamente la mitigazione climatica, abilita a benefici su tutti e due i fronti di produzione di danni (da cambiamento climatico e da inquinamento). A ben vedere, siffatta prospettiva appare coerente con quanto la scienza, non da oggi, suggeriva con la c.d. analisi dei “co-benefici” della mitigazione climatica. Il concetto di “co-benefici” implica una strategia “*win-win*” per raggiungere più obiettivi di eliminazione dei danni con

una singola misura politica<sup>3</sup>. Alla luce delle cinque sentenze richiamate, siffatta misura “win-win” risiede nella mitigazione climatica e non nel solo adempimento del rispetto delle soglie di inquinamento. Il che comporta un’ulteriore considerazione: l’analisi dei “co-benefici” non corrisponde al bilanciamento costituzionale, come tradizionalmente inteso e praticato (ovvero come contemperamento di interessi e diritti sul presente). Al contrario, i “co-benefici” devono includere, come richiesto dalla sentenza della Corte costituzionale 105/2024, la considerazione intergenerazionale degli interessi.

Dal punto di vista giuridico, l’interfaccia inquinamento-cambiamento climatico, abilitando all’integrazione delle politiche e delle azioni dei pubblici poteri, in coerenza, tra l’altro, con il principio europeo di “integrazione” ex artt. 11 TFUE e 37 Carta di Nizza-Strasburgo<sup>4</sup>, promuove processi ermeneutici di analogia tra tutela della salute umana nei confronti dell’inquinamento e tutela nella lotta al cambiamento climatico, come suggerito dalla sentenza della Corte europea nel caso *Verein KlimaSeniorinnen*.

D’ora in poi, ostinarsi nel credere che quello climatico non sia anche un problema di diritti umani, mentre lo possa essere quello dell’inquinamento, consumerebbe un errore giuridico, prima ancora che fattuale.

Pertanto, questo tipo di analogia non potrà più essere trascurato neppure dai giudici comuni italiani, se è vero, come hanno ribadito sempre di recente le Sezioni Unite Civili della Corte di Cassazione in tema di art. 12 *Preleggi* (sentenza del 6 dicembre 2021 n. 38596) – è, questa, la sesta decisione evocata –, «ragioni di coerenza dell’ordinamento e del sistema, nonché di certezza del diritto e di rispetto dei criteri d’interpretazione della legge» richiedono di escludere disparità di inquadramento giuridico a fronte di situazioni fattuali simili o interagenti, come appunto inconfutabilmente sono inquinamento e cambiamento climatico, immissioni “intollerabili” ed emissioni “inquinanti” e “climalteranti”.

L’attuazione concreta del principio di “integrazione” passa attraverso le cinque decisioni sintetizzate e le analogie *ivi* tracciate, in coerenza con quanto indicato dalla Corte di cassazione italiana sull’art. 12 delle *Preleggi*.

---

<sup>3</sup> J.P. Mayrhofer, J. Gupta, *The science and politics of co-benefits in climate policy*, in *Environmental Science & Policy*, 57, 2016, 22-30.

<sup>4</sup> F. Rolando, *L’attuazione del principio di integrazione ambientale nel diritto dell’Unione europea*, in *DPCE online*, sp-2, 2023, 561-574.

## Il duplice “mandato” ambientale tra costituzionalizzazione della preservazione intergenerazionale, *neminem laedere* preventivo e fattore tempo.

### Una prima lettura della sentenza della Corte costituzionale n. 105 del 13 giugno 2024

di Michele Carducci

1. La decisione della Corte costituzionale 105/2024 è stata salutata dall'ASviS – l'Associazione Italiana per lo Sviluppo Sostenibile – come “storica”<sup>1</sup>, per il fatto di aver inaugurato i contorni chiari di interpretazione e applicazione dei riformati articoli 9 e 41 della Costituzione. In effetti, la decisione contiene la prima corposa e argomentata chiave di lettura della riforma.

Per tale motivo, merita attenzione.

In questa sede, non è determinante ricostruire la vicenda del giudizio *a quo*, che ha dato luogo all'incidente di legittimità costituzionale. Il suo contenuto, tra l'altro, è ben riassunto, proprio per l'importanza delle questioni affrontate, dal comunicato stampa della Consulta del 13 giugno 2024, intitolato “*Il ‘Decreto Priolo’ alla luce della riforma degli articoli 9 e 41 della Costituzione*” (consultabile [qui](#)).

Interessa, invece, focalizzare i passaggi di diritto, scanditi dalla Corte al fine di orientare, d'ora in poi, tutti – dai pubblici poteri ai giudici, agli operatori economici – nella corretta applicazione dei riformati articoli costituzionali.

Si tratta delle seguenti novità, sintetizzate nei paragrafi che seguono:

- per la Corte, con la riforma, è stato introdotto un nuovo e autonomo “mandato” costituzionale di tutela ambientale, a duplice portata di vincolo e limite per tutti i soggetti dell'ordinamento (paragrafo 2),
- proiettato su contenuti di “preservazione” intergenerazionale di tutte le componenti della realtà ambientale (paragrafo 3),
- allo scopo di non “recare danno” alla salute umana, oltre che all'ambiente in sé, in continuità con la risalente dottrina giurisprudenziale della stessa Corte costituzionale sul *neminem laedere* preventivo, ma nella necessaria inclusione temporale delle generazioni future, con l'effetto di ricalibrare sia le valutazioni di conformità e adeguatezza delle fonti e degli atti sia le

---

<sup>1</sup> Cfr. Rete dei Comuni sostenibili, *Costituzione e ambiente: sentenza storica della Corte costituzionale per la prima volta con i nuovi principi contenuti negli art. 9 e 41*, in [www.comunisostenibili.eu/](http://www.comunisostenibili.eu/), 17 giugno 2024.

operazioni di bilanciamento, non più replicabili nello schema della sentenza 85/2013 (paragrafo 4),

- sicché tale dottrina appare oggi ancor più attuale e pregnante, perché coincidente con la “nuova” lettura dell’art. 8 CEDU, offerta dal caso *KlimaSeniorinnen* in tema di “*Primary Duty*” di preservazione dell’intero sistema climatico (che tutte le componenti ambientali include) a beneficio della presente e delle future generazioni (paragrafo 5).

2. Innanzitutto, balzano evidenti quattro precisazioni, che sembrano smentire, o comunque ridimensionare, le letture scettiche della riforma costituzionale, perorate da una parte della dottrina<sup>2</sup>.

La prima è la seguente. La riforma, spiega la Corte, introduce un «mutamento ... nella stessa formulazione dei parametri costituzionali sulla base dei quali deve essere condotto lo scrutinio» (costituzionale)<sup>3</sup>. Siamo, dunque, in presenza di un “mutamento”, non di una mera integrazione. Questo “mutamento”, si precisa nella decisione, interessa unitariamente tanto i poteri pubblici quanto i privati, perché definisce un “limite” alle attività umane, consacrato dal «mandato di tutela dell’ambiente, inteso come bene unitario, comprensivo delle sue specifiche declinazioni rappresentate dalla tutela della biodiversità e degli ecosistemi, ma riconosciuto in via autonoma rispetto al paesaggio e alla salute umana, per quanto ad essi naturalmente connesso».

La seconda precisazione verte proprio sull’espresa qualificazione dei riformati articoli come “mandato” costituzionale di tutela dell’ambiente, fondato non solo sulla qualificazione di quest’ultimo in termini di “bene unitario”, distinto dalla salute umana, ma anche sulla connessione “naturale” di questa con il primo. In pratica, con l’inciso «naturalmente connesso», la Corte si apre a una prospettiva di antropocentrismo “moderato”<sup>4</sup>, evocativo, da un lato, del più nitido c.d. “mandato ecologico”, tipico delle Costituzioni andine<sup>5</sup>, e, dall’altro,

---

<sup>2</sup> Tra le più implacabili, si v. quella G. Di Plinio, *L’insostenibile evanescenza della costituzionalizzazione dell’ambiente*, in *www.federalismi.it*, paper 1 luglio 2021, 1-8. In forma almeno dubitativa, si v., invece, E. Mostacci, *Proficuo, inutile o dannoso? Alcune riflessioni a partire dal nuovo testo dell’art. 41*, in *DPCE online*, 2, 2022, 1123-1133, e G. Vivoli, *La modifica degli artt. 9 e 41 della Costituzione*, in *Queste Istituzioni*, 1, 2022, 8-43.

<sup>3</sup> Paragrafo 5.1.2 del *Considerato in diritto*: tutti i successivi virgolettati della sentenza attingono sempre dal medesimo paragrafo, salvo diversa indicazione.

<sup>4</sup> T. Guarnier, *Antropocentrismo ed ecocentrismo nella prospettiva costituzionale*, in M.P. Paternò (a cura di), *Cura dell’altro. Interdipendenza e disuguaglianza nelle democrazie contemporanee*, Napoli, 2017, 119-143.

<sup>5</sup> Su cui, il noto E. Gudynas, *El Mandato Ecológico*, Quito, 2009.

confermativo certamente della prospettiva *One Health-Planetary Health*<sup>6</sup>, propria del *Green Deal* europeo e del diritto ordinario italiano<sup>7</sup>.

Ma la Consulta puntualizza pure che le riformate disposizioni vanno «lette anche attraverso il prisma degli obblighi europei e internazionali in materia», attribuendo a essi quel duplice ruolo, già ammesso dalla giurisprudenza costituzionale: di integrazione di ulteriori parametri esterni, a partire dalle fonti del *Green Deal* e dalla CEDU, come interpretata dalla Corte di Strasburgo, per includere tutto il diritto internazionale e nella differenziazione tra vincoli di conformazione e meri orientamenti di interpretazione, anch'essa – tale differenziazione – recentemente ribadita con la sentenza 7/2024; di eventuale controlimite agli stessi, come già prefigurato in dottrina, in forza della collocazione dell'art. 9 tra i principi fondamentali<sup>8</sup>.

Ne deriva, e siamo alla quarta precisazione, che quel “mandato” «vincola, così, esplicitamente, tutte le pubbliche autorità ad attivarsi in vista della sua efficace difesa».

Insomma, gli artt. 9 e 41 riformati, introducono un “vincolo” diretto per tutte le autorità pubbliche e un “limite” altrettanto diretto per tutte le attività, sia pubbliche che private.

D'ora in poi, grazie a questa sentenza, il “mandato” costituzionale ambientale funzionerà in questa duplice modalità.

3

3. Tuttavia, la novità non si esaurisce alla sola insorgenza del vincolo-limite. A cambiare, rispetto al passato, è la declinazione temporale degli enunciati costituzionali che lo esprimono. Anche su questo, la Corte effettua tre passaggi ben chiari.

In primo luogo, ci tiene a sottolineare il carattere confermativo della riforma in merito all'esistenza di un «diritto fondamentale della persona ed interesse fondamentale della collettività» alla salvaguardia dell'ambiente, ricordando, alla luce della propria giurisprudenza, che l'oggetto del diritto/interesse è olistico, nel senso di includere «la conservazione, la razionale gestione e il miglioramento delle condizioni naturali (aria, acque, suolo e territorio in tutte le sue componenti), la esistenza e la preservazione dei patrimoni genetici terrestri e marini, di tutte le specie animali e vegetali che in esso vivono allo stato naturale», in quanto «valori che in sostanza la Costituzione

---

<sup>6</sup> Sulla non oggettiva corrispondenza tra approccio ecocentrico e *One Health-Planetary Health*, si v. G. Shannon *et al.*, *Planet.Health: An Ecosystem Approach to Imagine and Coordinate for Planetary Health Futures*, in *Challenges*, 14, 2023, 39-52.

<sup>7</sup> Con l'istituzione del “Sistema nazionale prevenzione salute dai rischi ambientali e climatici” (Snps).

<sup>8</sup> Cfr. A. Morrone, *L'«ambiente» nella Costituzione. Premesse di un nuovo «contratto sociale»*, in AIDAmbiente, *La riforma costituzionale in materia di tutela dell'ambiente*, Napoli, 2022, 91-122.

prevede e garantisce». Se ne deduce che il “mandato” ambientale contiene in sé il diritto fondamentale all’ambiente, nelle sue plurime ma integrate manifestazioni e interpretazioni.

In secondo luogo, spiega che la “conservazione”, la “razionale gestione” e il “miglioramento” dell’oggetto di questo diritto/interesse convergono ora in un «preciso dovere» intergenerazionale, operante nell’interesse «dei singoli e della collettività nel momento presente, nonché di chi ancora non è nato». Insomma, il diritto/interesse è intergenerazionale perché impone, oltre al vincolo-limite, la proiezione intertemporale dell’azione verso il futuro. Siffatta intertemporalità si concretizza nel «preservare le condizioni» affinché pure le future generazioni possano «godere di un patrimonio ambientale il più possibile integro, e le cui varie matrici restino caratterizzate dalla ricchezza e diversità che lo connotano». Il nuovo “mandato” vincola i soggetti ma è, a sua volta, vincolato dal tempo futuro; e questo non più per sineddoche su “prefigurazione” ricavabile dall’art. 2 Cost., come in passato<sup>9</sup>, bensì per diritto positivo esplicito. Se dovessimo utilizzare una recente, brillante teoria generale del diritto<sup>10</sup>, si potrebbe concludere che la riforma costituzionale sposa la prospettazione dell’agire come “logica *FI-FO*” dove il futuro (*F*) è insieme *Input (I)* e *Output (O)* della legalità.

Del resto, anche su questo lato, la Consulta non omette di ribadire che il «preciso dovere» non esclude il privato, dato che lo stesso è tenuto a non «recare danno» – oltre che alla sicurezza, alla libertà, alla dignità umana, come recitava il testo previgente dell’art. 41, secondo comma, Cost. – alla salute e all’ambiente.

4. Si raggiunge così lo sbocco finale: il nuovo “mandato” costituzionale include un altrettanto esplicito dovere costituzionale di preservazione ambientale intergenerazionale, finalizzato a non «recare danno» sul presente e sul futuro.

Il che inaugura la stagione del bilanciamento costituzionale del tempo («nel momento presente, nonché di chi ancora non è nato»).

Da un punto di vista di teoria economica del diritto, è come se la Consulta avesse fatto proprie entrambe le prospettive di responsabilizzazione dell’azione impattante sull’ambiente, in termini di internalizzazione dei costi: quella pubblicistica “pigouviana”, che propone, come soluzione al problema delle “esternalità”, l’intervento pubblico (il “vincolo” diretto per tutte le autorità pubbliche); e quella privatistica “contrattuale”, risalente al c.d. “teorema di

---

<sup>9</sup> Infatti, la Corte costituzionale ricorda che l’esistenza di un generale dovere intergenerazionale era stato già «prefigurato da numerose pronunce ... risalenti a epoca anteriore alla riforma», rigorosamente elencate quasi a rimarcarne la continuità evolutiva: sentenze 46/2021 (p. 8 *Considerato in diritto*); 237/2020 (p. 5 *Considerato in diritto*); 93/2017 (p. 8.1 *Considerato in diritto*); 22/2016 (p. 6 *Considerato in diritto*); 67/2013 (p. 4 *Considerato in diritto*); 142/2010 (p. 2.2.2 *Considerato in diritto*); 29/2010 (p. 2.1 *Considerato in diritto*); 246/2009 (p. 9 *Considerato in diritto*); 419/1996 (p. 3 *Considerato in diritto*).

<sup>10</sup> S. Shapiro, *Legality*, Cambridge (Ma), 2011.

Coase”, che affida invece all’autonomia privata il compito di gestire il rischio delle esternalità (ed è quanto si desume dal “limite” altrettanto diretto imputato anche alle attività private)<sup>11</sup>; con l’aggiunta, però, della variabile tempo, declinata al futuro.

Lo schema dei diritti “tiranni”, sancito dalla nota decisione 85/2013 sul “caso *ex Ilva*”, ne esce sbiadito, inesorabilmente inattuale. Lo lascia intendere sempre la Corte, con le ultime sue tre mosse argomentative.

Da un lato, la portata onnicomprensiva di quel precedente è accantonata, dato che «le questioni decise con [quella] sentenza ... erano in larga parte incentrate su parametri costituzionali estranei al presente giudizio» perché appunto precedenti la riforma e non riferite comunque all’art. 9 Cost. Del resto, a quell’epoca, l’esclusione di qualsiasi diritto “tiranno” non poteva certo investire il fattore “temporale” dell’interesse intergenerazionale, non elencato tra i principi fondamentali.

Dall’altro, è enfatizzata, proprio a causa del nuovo protagonismo intergenerazionale, la sentenza 58/2018, la quale, nella logica del non «recare danno» nel tempo, ha affermato che rimuovere «prontamente i fattori di pericolo per la salute, l’incolumità e la vita costituisce [...] condizione minima e indispensabile perché l’attività produttiva si svolga in armonia con i principi costituzionali, sempre attenti anzitutto alle esigenze basilari della persona».

5

Siffatte «esigenze», e siamo all’ultima mossa, devono sempre annoverare,

- sul piano soggettivo, le persone oggi esistenti e quelle che saranno,
- e, sul piano oggettivo, la tutela dell’ambiente nella sua nuova manifestazione anch’essa intergenerazionale<sup>12</sup>.

Insomma, la conformazione costituzionale dell’agire è ineluttabilmente parametrata al tempo presente e futuro. Di conseguenza, anche l’altra deduzione della decisione 85/2013, quella della scissione tra conformità e adeguatezza, con il prevalere della prima sulla seconda<sup>13</sup>, non ha più senso: rispettare la Costituzione significa considerare il tempo futuro, oltre al presente, sicché sarà l’adeguamento al futuro a certificare la conformità nel presente; non più l’inverso.

Il risvolto pratico di questo ordito si intravede dal modo in cui la Corte riprende alcuni suoi precedenti. Di tutta la propria giurisprudenza “ambientale”, essa richiama quella più risalente: nello specifico, le decisioni 210/1987, al p. 4.5 del *Considerato in diritto*, e 641/1987, al p. 2.2 del *Considerato in diritto*. Non sembra casuale questo passato remoto. Le due pronunce, congiuntamente con la

<sup>11</sup> Per una sintesi delle due prospettive, si rinvia a S.M. Shavell, *Fondamenti dell’analisi economica del diritto*, trad. it., Torino, 2005.

<sup>12</sup> Paragrafo 5.4.1 del *Considerato in diritto*.

<sup>13</sup> Su questa lettura abilitata dalla sentenza 85/2013, si v. L. Geninatti Santé, *La tutela dell’ambiente come strumento necessario per la protezione dei diritti individuali e il sindacato giurisdizionale sulla sua inadeguatezza*, in *Corti Supreme e Salute*, 2, 2019, 235-244.

184/1986, hanno fondato quella che la stessa Consulta qualificherà propria posizione «fermissima nel ritenere che ogni menomazione della salute, definita espressamente come (contenuto di un) diritto fondamentale dell'uomo, implichi la tutela risarcitoria *ex art. 2043 Cod. civ.*, indipendentemente ... dalla ricorrenza di un danno patrimoniale» (sentenza 307/1990, p. 3 del *Considerato in diritto*).

La “menomazione” della salute altro non è che il “danno”. Del resto, da quella “fermissima” giurisprudenza hanno preso avvio sia l'obbligo di interpretazione conforme dell'art. 2043 Cod. civ. all'art. 32 Cost (ordinanza 82/1995), sia la lettura della responsabilità extracontrattuale in termini di divieto primario a non “menomare” (sentenza 202/1991, p. 5 del *Considerato in diritto*), sia l'abilitazione alla tutela preventiva verso «tutta la gamma delle conseguenze dannose che derivano dalla violazione effettuata» (sent. 641/1987, p. 2.2 del *Considerato in diritto*).

In sostanza, i precedenti citati, riferendosi al *neminem laedere* anche in funzione di prevenzione del danno, sono risultati i più appropriati a corroborare la tesi del dovere di preservazione intergenerazionale: il bilanciamento tra tempo presente e tempo futuro è operazione di tutela del futuro esistenziale in nome del *neminem laedere* (non «recare danno»)<sup>14</sup>.

5. Da tale angolo di visuale, l'enfasi costituzionale convince ulteriormente, alla luce della recentissima decisione della Corte di Strasburgo sul caso *KlimaSeniorinnen* (ricorso [53600/20](#)), nella parte in cui si fa desumere dall'art. 8 CEDU l'esistenza di un “*Primary Duty*” di azione preventiva con funzione appunto di preservazione delle generazioni future dagli effetti negativi del cambiamento climatico antropogenico. 6

Poiché il sistema climatico non è altro che il contenitore geo-fisico e bio-fisico di tutte le componenti ambientali, in qualsiasi modo esse siano identificate e tematizzate, la conclusione della Corte europea si presenta speculare alle tesi della Consulta sui nuovi articoli riformati; e poiché, in questa sentenza, la Corte italiana invita a leggere le riformate disposizioni «anche attraverso il prisma degli obblighi europei e internazionali in materia», la conclusione da trarne è solo una: il non «recare danno» alle generazioni future, oltre a quelle presenti, è “mandato” costituzionale e convenzionale al tempo stesso, predicabile in ragione tanto del *neminem laedere* preventivo, già risalentemente avallato dalla Corte italiana, quanto dell'art. 8 CEDU, aggiornato dalla Corte europea.

Si potrebbe concludere nei seguenti termini, facendo proprio il lessico “olistico” della sentenza in commento:

---

<sup>14</sup> Sulle diverse declinazioni del *neminem laedere*, si v. S. Zorzetto, *Sulla violazione del principio del neminem laedere: costruzioni dogmatiche, teorie e ideologie*, in *Storia Metodo Cultura nella scienza giuridica*, 2, 2023, 37-98.

- «preservare le condizioni» affinché pure le future generazioni possano «godere di un patrimonio ambientale il più possibile integro»,
- altro non può significare, per “connessione” naturale, che “preservare” le generazioni future dagli effetti negativi del cambiamento climatico,
- come indicato dalla Corte di Strasburgo alla luce dell’art. 8 CEDU,
- dato che le riformate disposizioni costituzionali vanno «lette anche attraverso il prisma degli obblighi europei e internazionali in materia».

Una via di fuga da questo circuito non è più percorribile, perché illegittima (dunque non conforme) e dannosa (dunque non adeguata) rispetto al tempo, esso si “tiranno” sui diritti, presenti e futuri, se lo si continua a ignorare.

*Pubbllichiamo la traduzione di questo articolo molto rilevante sul tema del cambiamento climatico, uscito su Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS).*

## FINALE DI PARTITA SUL CLIMA: ESPLORARE GLI SCENARI CATASTROFICI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

**Luke Kemp<sup>a,b,\*</sup>, Chi Xu<sup>c</sup>, Joanna Depledge<sup>d</sup>, Kristie L. Ebi<sup>e</sup>, Goodwin Gibbins<sup>f</sup>,  
Timothy A. Kohler<sup>g,h,i</sup>, Johan Rockström<sup>j</sup>, Marten Scheffer<sup>k</sup>,  
Hans Joachim Schellnhuber<sup>j,l</sup>, Will Steffen<sup>m</sup>, and Timothy M. Lenton<sup>n</sup>**

<sup>a</sup> Centre for the Study of Existential Risk, University of Cambridge, United Kingdom.

<sup>b</sup> Centre for the Study of Existential Risk, e Darwin College, University of Cambridge, United Kingdom.

<sup>c</sup> School of Life Sciences, Nanjing University, China.

<sup>d</sup> Cambridge Centre for Environment, Energy and Natural Resource Governance, University of Cambridge, , United Kingdom.

<sup>e</sup> Center for Health and the Global Environment, University of Washington, Seattle, USA.

<sup>f</sup> Future of Humanity Institute, University of Oxford, United Kingdom.

<sup>g</sup> Department of Anthropology, Washington State University, Pullman, USA.

<sup>h</sup> Santa Fe Institute, Santa Fe, USA.

<sup>i</sup> Cluster of Excellence ROOTS – Social, Environmental, and Cultural Connectivity in Past Societies, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, Germany.

<sup>j</sup> Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany.

<sup>k</sup> Department of Environmental Sciences, University of Wageningen, The Netherlands.

<sup>l</sup> Earth System Science Department, Tsinghua University, Beijing, China.

<sup>m</sup> Fenner School of Environment and Society, The Australian National University, Canberra, Australia.

<sup>n</sup> Global Systems Institute, University of Exeter, United Kingdom.

### Sommario

Una gestione prudente del rischio richiede di prendere in considerazione gli scenari che rappresentano i casi peggiori. Eppure, riguardo ai cambiamenti climatici, tali futuri potenziali sono poco compresi. I cambiamenti climatici di origine antropica potrebbero causare un collasso della società su scala globale o un'eventuale estinzione dell'umanità? Fino a oggi questo è rimasto un argomento pericolosamente inesplorato. Tuttavia, ci sono buoni motivi per sospettare che i cambiamenti climatici possano provocare una catastrofe globale. Analizzare i meccanismi alla base di queste conseguenze estreme potrebbe contribuire a galvanizzare l'azione, migliorare la resilienza e fornire informazioni ai decisori politici, anche riguardo alle misure di emergenza. Accenniamo alle conoscenze attuali sulle probabilità di cambiamenti climatici estremi, trattiamo del perché è di importanza vitale capire i casi peggiori, mostriamo i motivi per cui preoccuparsi di sviluppi catastrofici, definiamo i

termini chiave e proponiamo un programma di ricerca. Il programma prende in esame quattro grandi domande: 1) Che possibilità hanno i cambiamenti climatici di innescare eventi di estinzione di massa? 2) Quali sono i meccanismi che possono causare nell'umanità morbilità e mortalità di massa? 3) Quali sono i punti deboli delle società umane rispetto ai rischi a cascata innescati dai cambiamenti climatici, come quelli derivanti da conflitti, instabilità politica e rischi finanziari sistemici? 4) Come sintetizzare utilmente queste molteplici evidenze – insieme ad altri pericoli globali – in una “valutazione integrata della catastrofe”? È ora che la comunità scientifica affronti la sfida di una migliore comprensione dei cambiamenti climatici catastrofici.

**Parole chiave:** *cambiamenti climatici catastrofici, cambiamenti climatici, traiettorie del sistema Terra, Antropocene; punti critici.*

IdA



\* Per contatti: ltk27@cam.ac.uk.

## CLIMATE ENDGAME: EXPLORING CATASTROPHIC CLIMATE CHANGE SCENARIOS

### Abstract

Prudent risk management requires consideration of bad-to-worst-case scenarios. Yet, for climate change, such potential futures are poorly understood. Could anthropogenic climate change result in worldwide societal collapse or even eventual human extinction? At present, this is a dangerously underexplored topic. Yet there are ample reasons to suspect that climate change could result in a global catastrophe. Analyzing the mechanisms for these extreme consequences could help galvanize action, improve resilience, and inform policy, including emergency responses. We outline current knowledge about the likelihood of extreme climate change, discuss why understanding bad-to worst cases is vital, articulate

reasons for concern about catastrophic outcomes, define key terms, and put forward a research agenda. The proposed agenda covers four main questions: 1) What is the potential for climate change to drive mass extinction events? 2) What are the mechanisms that could result in human mass mortality and morbidity? 3) What are human societies' vulnerabilities to climate triggered risk cascades, such as from conflict, political instability, and systemic financial risk? 4) How can these multiple strands of evidence – together with other global dangers – be usefully synthesized into an “integrated catastrophe assessment”? It is time for the scientific community to grapple with the challenge of better understanding catastrophic climate change.

**Keyword:** *catastrophic climate change, climate change, Earth system trajectories; Anthropocene, tipping elements.*

### Introduzione

Quanto possono peggiorare i cambiamenti climatici? Già nel 1988 la dichiarazione scaturita dalla Conferenza di Toronto, che rappresenta una pietra miliare, descriveva le conseguenze ultime dei cambiamenti climatici come potenzialmente “secondo solo a una guerra nucleare globale”. Nonostante l'allarme lanciato decenni fa, la catastrofe climatica è relativamente poco studiata e pochissimo compresa.

La possibilità di impatti catastrofici dipende dalla magnitudine e dalla velocità dei cambiamenti climatici, dai danni inflitti ai sistemi planetari e umani, e dalla vulnerabilità e dalla reattività dei sistemi colpiti. Gli estremi di questi fenomeni, come un aumento brusco delle temperature e gli impatti a cascata, non sono stati esaminati a sufficienza. Come notato dall'IPCC, il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici, sono state realizzate poche stime quantitative degli impatti globali aggregati derivanti da un riscaldamento di 3°C o più (1). Anche un'analisi testuale dei rapporti dell'IPCC ha mostrato che gli studi relativi ad aumenti di 3°C o più sono troppo poco rappresentati in relazione alla loro probabilità (2). L'analisi indica anche che nel tempo l'oggetto degli studi contenuti nei rapporti dell'IPCC si sia spostato verso aumenti di 2°C o inferiori <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022EF002876>. La ricerca si è concentrata sugli impatti degli aumenti di temperatura di 1,5°C e 2°C, e sono pochi gli studi su gli impatti climatici potrebbero ripercuotersi a cascata o innescare crisi più grandi.

Una valutazione accurata dei rischi dovrebbe considerare come questi si diffondono, interagiscono, si amplificano e vengono aggravati dalle reazioni uma-

ne (3), ma neanche le più semplici analisi dei “rischi compositi” generati dall'interazione dei rischi climatici con le cause dei cambiamenti climatici vengono usate a sufficienza. Eppure, è così che i rischi si concretizzano nel mondo reale. Per esempio, un ciclone distrugge le infrastrutture elettriche rendendo la popolazione vulnerabile a una successiva ondata di calore letale (4). Recentemente abbiamo visto rischi compositi emergere tra i cambiamenti climatici e la pandemia di COVID-19 (5). Come sottolineato dall'IPCC, i rischi climatici stanno diventando più complessi e difficili da gestire e si stanno ripercuotendo a cascata in diverse regioni e in diversi settori (6).

Perché ci si è concentrati sui valori più bassi di riscaldamento e su analisi semplici dei rischi? Un motivo è lo standard di riferimento degli obiettivi internazionali: l'obiettivo dell'Accordo di Parigi di limitare il riscaldamento ben al di sotto dei 2°C, con l'aspirazione di 1,5°C. Un'altra ragione è che la scienza del clima tende a “peccare di scarsa drammaticità” (7), a non essere allarmista, e a questo si aggiunge il processo dell'IPCC basato sul consenso (8). Le valutazioni complesse dei rischi, pur essendo più realistiche, sono anche le più difficili.

Questa cautela è comprensibile, eppure è inadeguata ai rischi e ai danni potenziali. Sappiamo che l'aumento delle temperature ha una distribuzione “coda grassa”: eventi estremi con bassa probabilità e alto impatto (9). È probabile che i danni non siano lineari e abbiano code ancora più pesanti (10). La posta è troppo alta per astenersi dall'esaminare gli scenari ad alto impatto e bassa probabilità. La pandemia di COVID-19 ha sottolineato il bisogno di tenere in considerazione e prepararci a rischi globali infrequenti ad

alto impatto e ai pericoli sistemici che possono derivarne. Una gestione prudente dei rischi richiede di valutare scrupolosamente gli scenari dei casi peggiori. Il programma di ricerca “Finale di partita sul clima” (Climate endgame) che abbiamo proposto mira a esplorare direttamente i rischi peggiori associati ai cambiamenti climatici di origine antropica. Per presentarlo riassumiamo le evidenze sulla probabilità di cambiamenti estremi, vediamo perché è di importanza vitale esplorare gli scenari relativi ai casi peggiori, suggeriamo motivi di preoccupazione per una catastrofe, definiamo i termini chiave e poi spieghiamo i quattro aspetti fondamentali del programma di ricerca.

### I cambiamenti climatici peggiori

Nonostante trent'anni di sforzi ed alcuni progressi nell'ambito della Convenzione Quadro della Nazioni Unite sul Cambiamento Climatico (UNFCCC), le emissioni di gas serra di origine antropica continuano ad aumentare. Anche senza considerare le risposte ai cambiamenti climatici peggiori, l'attuale traiettoria avvia il mondo a un aumento della temperatura tra 2,1°C e 3,9°C entro il 2100 (11). Se tutti i contributi determinati a livello nazionale (NDC) per gli anni Trenta di questo secolo fossero rispettati, ci si aspetta entro il 2100 un riscaldamento di 2,4°C (da 1,9°C a 3,0°C). Mantenere tutti gli impegni a lungo termine e raggiungere questi obiettivi potrebbe ridurre a 2,1°C (da 1,7°C a 2,6°C) (12). Persino queste assunzioni ottimistiche portano a traiettorie pericolose per il sistema Terra. Temperature di oltre 2°C sopra i valori preindustriali non si sono viste sulla superficie terrestre dal Pleistocene (o da più di 2,6 milioni di anni fa) (13).

Anche se le emissioni di gas serra di origine antropica cominciassero a diminuire presto, non sarebbe esclusa la possibilità futura di alte concentrazioni di gas serra o di cambiamenti climatici estremi, in particolare dopo il 2100. Ci sono dei feedback nel ciclo del carbonio e potenziali punti critici che potrebbero generare alte concentrazioni di gas serra (14), che spesso non rientrano nei modelli. Alcuni esempi comprendono lo scioglimento del permafrost artico che rilascia metano e CO<sub>2</sub> (15), l'emissione di carbonio dovuta a intense siccità e a incendi in Amazzonia (16), e l'evidente rallentamento dei feedback mitiganti come la capacità naturale di assorbimento del carbonio (17, 18). Questi feedback probabilmente non saranno proporzionali al riscaldamento, come a volte si assume. Invece, cambiamenti improvvisi e/o irreversibili possono innescarsi al raggiungimento di una certa soglia di temperatura. Tali cambiamenti sono evidenti negli archivi geologici della Terra, e il loro impatto ha avuto ricadute a cascata sui sistemi climatici-ecologici-so-

ciali interconnessi (19). Particolarmente preoccupante è una “cascata di punti critici” nella quale più elementi critici (“tipping elements”) interagiscono in modo tale che il superamento di una soglia accresce le probabilità di superarne un'altra (20). L'aumento di temperatura è fortemente dipendente dalle dinamiche globali del sistema Terra, non solo dalla traiettoria delle emissioni di origine antropica.

Nei modelli esistenti è evidente la possibilità che si raggiungano punti critici e alte concentrazioni nonostante una diminuzione delle emissioni di origine antropica. La variabilità tra gli ultimi modelli climatici del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) porta ad una sovrapposizione fra i diversi scenari. Per esempio, il risultato del quartile superiore (75°) dello scenario “A metà strada” (Shared Socioeconomic Pathway 3-7.0, o SSP3-7.0) è significativamente più caldo del quartile inferiore (25°) dello scenario con le emissioni più alte (SSP5-8.5). Le differenze di temperatura regionali tra i modelli possono superare valori tra 5°C e 6°C, in particolare nelle zone polari, nelle quali è possibile un superamento di diversi punti critici (si veda l'Appendice nel Materiale Supplementare).

Ci sono feedback ancora più incerti che, nel caso peggiore, potrebbero amplificare gli impatti fino a una transizione irreversibile a uno stato di “Terra serra riscaldata” (21) (sebbene feedback negativi potrebbero contribuire ad attenuare gli impatti sul sistema Terra). In particolare, i poco compresi feedback legati alle nubi potrebbero innescare un riscaldamento globale improvviso e irreversibile (22). Tali effetti rimangono inesplorati e in gran parte costituiscono “incognite ignote” ancora speculative e da scoprire. Per esempio, recenti simulazioni suggeriscono un'improvvisa scomparsa dei banchi di stratocumuli a concentrazioni di CO<sub>2</sub> che potrebbero essere raggiunte entro la fine del secolo, causando un riscaldamento globale aggiuntivo di circa 8°C (23). Grandi incertezze riguardo a sorprese pericolose sono un motivo per farle diventare prioritarie invece di trascurarle.

Recenti scoperte sulla sensibilità climatica all'equilibrio (ECS) (14, 24) sottolineano che la magnitudine dei cambiamenti climatici sarebbe incerta anche se conoscessimo le concentrazioni di gas serra future. Secondo l'IPCC, la nostra stima migliore per l'ECS è un aumento della temperatura di 3°C per raddoppio della CO<sub>2</sub> con un range “probabile” tra 2,5°C e 4°C (tra il 66% e 100% di probabilità). Dato che un ECS inferiore a 1,5°C è stato di fatto escluso, rimane un 18% di probabilità che possa essere superiore a 4,5°C (14). La distribuzione dell'ECS ha una “coda grassa”, con una probabilità di valori molto alti superiore a quella per valori molto bassi.

C'è un'incertezza significativa anche riguardo al futuro delle emissioni di gas serra di origine antropica. Il Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5, ora SSP5-8.5), il percorso con le emissioni più alte utilizzato negli scenari dell'IPCC, è quello che più si avvicina alle emissioni globali fino a oggi (25). Questo potrebbe non essere lo scenario che ci aspetta, a causa della forte riduzione dei prezzi delle energie rinnovabili e delle risposte politiche (26). Eppure, restano motivi di cautela. Per esempio, c'è un'incertezza significativa su variabili chiave come la domanda di energia e la crescita economica. È plausibile che tassi di crescita economica più alti possano portare ad un aumento del 35% della probabilità dello scenario RCP8.5 (27).

### **Perché esplorare la catastrofe climatica?**

Perché ci servono informazioni riguardo a plausibili casi peggiori? Per prima cosa, la gestione dei rischi e un solido processo decisionale in condizioni di incertezza richiedono una conoscenza dei casi estremi. Per esempio, il criterio Minimax (minimizzazione della massima perdita possibile) valuta le politiche in base ai loro risultati peggiori (28). È un approccio particolarmente appropriato per le aree caratterizzate da incertezze e “rischi estremi” elevati [NdR: il termine “tail risks” è stato tradotto con “rischi estremi”, ad indicare i rischi molto rilevanti associati a bassi livelli di probabilità che sono rappresentati dalle code delle distribuzioni di probabilità delle variabili climatiche, come temperature o precipitazioni intense]. La traiettoria delle emissioni, le concentrazioni future, il riscaldamento futuro e gli impatti futuri sono tutti caratterizzati da incertezza. Cioè, non possiamo oggettivamente assegnare delle probabilità ai diversi esiti (29). I danni climatici rientrano nell'ambito della “profonda incertezza”: non conosciamo le probabilità relative ai diversi esiti, l'esatta catena di cause ed effetti che li precede e nemmeno l'estensione, la tempistica o la desiderabilità di questi esiti (30). L'incertezza, profonda o no, è un motivo di cautela e vigilanza, non di noncuranza.

Gli impatti catastrofici, anche se improbabili, hanno importanti implicazioni per l'analisi economica, la creazione di modelli e le risposte della società (31, 32). Per esempio, il riscaldamento estremo e i danni conseguenti possono fare aumentare significativamente i costi sociali del carbonio (31). Comprendere le vulnerabilità e le risposte delle società umane può fornire informazioni ai decisori politici per prevenire crisi sistemiche. Alcuni indicatori delle variabili chiave possono fornire segnali di allerta tempestivi (33).

Conoscere i casi peggiori può costringere ad agire, come successe per l'idea di “inverno nucleare” che nel

1983 galvanizzò la preoccupazione dei cittadini e gli sforzi per un disarmo nucleare. Esplorare scenari di rischi gravi e temperature più elevate potrebbe consolidare un rinnovato impegno a rispettare un limite tra 1,5°C e 2°C, in quanto opzione “meno spiacevole” (34).

Comprendere gli scenari climatici catastrofici può anche fornire informazioni utili alle azioni politiche, comprese le misure di emergenza e di “ultima spiaggia” come la gestione della radiazione solare (SRM) e l'iniezione di aerosol nella stratosfera (SAI) per riflettere la luce solare (35). Il fatto di ricorrere o no a tali misure dipende dai profili di rischio degli scenari di cambiamento climatico e di SRM. Una recente analisi del potenziale rischio catastrofico della SAI ha rilevato che gli impatti diretti e sistemici non sono stati sufficientemente studiati (36). Il pericolo principale sembra derivare dallo “shock finale”: un improvviso e rapido riscaldamento nel caso di un arresto del sistema SAI. Quindi la SAI cambia la distribuzione dei rischi: l'esito mediano potrebbe essere migliore per il cambiamento climatico che sta compensando, ma la sua “coda grassa” potrebbe essere peggiore del riscaldamento (36).

Una comprensione più corretta dei cambiamenti climatici catastrofici faciliterebbe altri interventi. A livello internazionale, per esempio, potrebbe esserci “un trattato sui rischi estremi”: un accordo o protocollo che attiva impegni e procedure più stringenti quando si raggiungono indicatori di un cambiamento brusco potenziale.

### **Il potenziale per una catastrofe climatica**

Ci sono 4 motivi cruciali per cui preoccuparsi della possibilità di una catastrofe climatica globale. Primo, ci sono gli avvertimenti che ci vengono dalla storia. In passato i cambiamenti climatici (sia regionali che globali) hanno avuto un ruolo nel collasso o nella trasformazione di numerose società (37), e in ognuno dei cinque eventi di estinzione di massa nella storia della Terra verificatisi nel Fanerozoico (38). L'attuale spinta data dal carbonio si sta verificando a una velocità che non ha precedenti nella storia geologica, entro la fine del secolo le concentrazioni potrebbero superare soglie che hanno innescato precedenti estinzioni di massa (39, 40). Gli scenari peggiori nel rapporto dell'IPCC prevedono per il XXII secolo temperature che sono state così alte all'inizio dell'Eocene, ribaltando nell'arco di due secoli 50 milioni di anni con climi più freddi (41).

Questo è particolarmente allarmante, dato che le società umane si sono adattate localmente a una specifica nicchia climatica. L'inizio di società agricole urbanizzate su larga scala risale al passaggio al clima

stabile dell'Olocene circa 12.000 anni fa (42). Da allora la densità della popolazione umana ha avuto un picco all'interno di una ristretta fascia di variazione delle temperature, con media annuale di circa 13°C. Persino oggi i centri economicamente più produttivi delle attività umane sono concentrati in queste aree (43). Gli impatti cumulativi del riscaldamento potrebbero superare la capacità di adattamento delle società.

Secondo, i cambiamenti climatici potrebbero innescare direttamente altri rischi catastrofici, come quello di conflitti internazionali, o di aumento della diffusione di malattie infettive o ripercussioni di vario genere. Questi fattori potrebbero essere potenti moltiplicatori delle minacce estreme.

Terzo, i cambiamenti climatici potrebbero esacerbare le vulnerabilità e causare stress multipli indiretti (come danni economici, perdita di suolo e insicurezza idrica e alimentare) che si fondono dando origine a malfunzionamenti contemporanei a livello sistemico. Questo è il percorso del rischio sistemico. Durante questi "guasti sincronizzati" tendono a verificarsi delle crisi che si estendono oltre i confini di paesi e sistemi, come successo con la crisi finanziaria globale del 2007-2008 (44). È plausibile che un improvviso cambiamento del clima possa innescare guasti sistemici che porterebbero al crollo delle società in tutto il mondo.

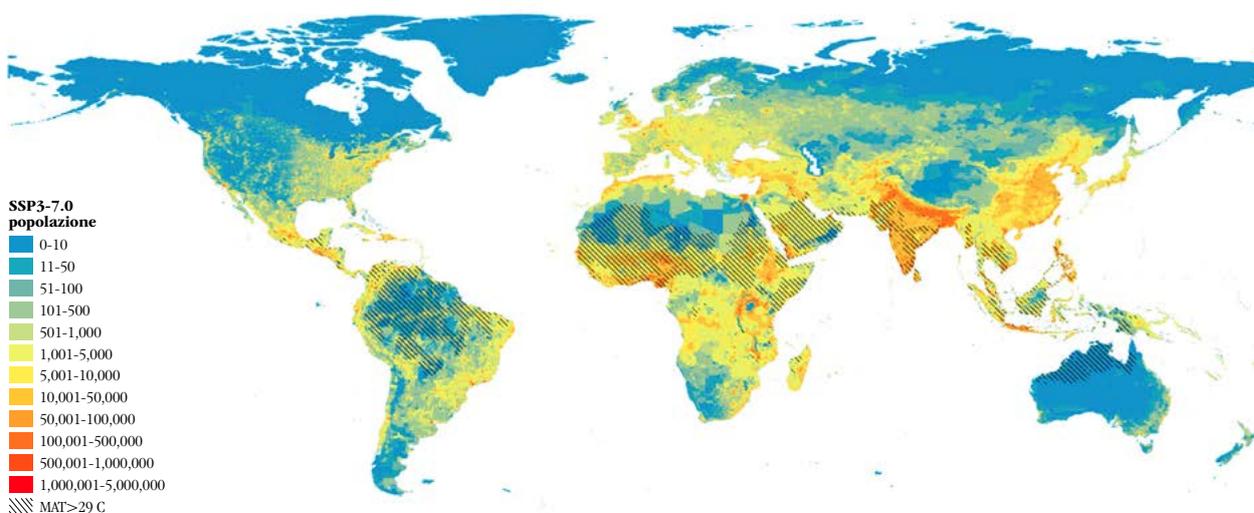
C'è un netto potenziale di rischio climatico sistemico: gli stati e le comunità più vulnerabili continueranno a subire gli impatti peggiori in un mondo in via di riscaldamento, e questo porterà a un esacerbarsi delle disuguaglianze. La Figura 1 mostra come la densità di popolazione prevista si interseca con gli estremi di una temperatura media annuale (TMA) superiore ai 29°C (temperature simili sono attualmente limitate allo

0,8% della superficie del suolo terrestre). Utilizzando lo scenario medio-alto delle emissioni e della crescita demografica (SSP3-7.0 per le emissioni, e SSP3 per la crescita demografica), entro il 2070 si prevede che circa due miliardi di persone vivranno in queste aree estremamente calde. Attualmente ci vivono solo 30 milioni di persone, principalmente nel deserto del Sahara e sulla costa del Golfo persico (43).

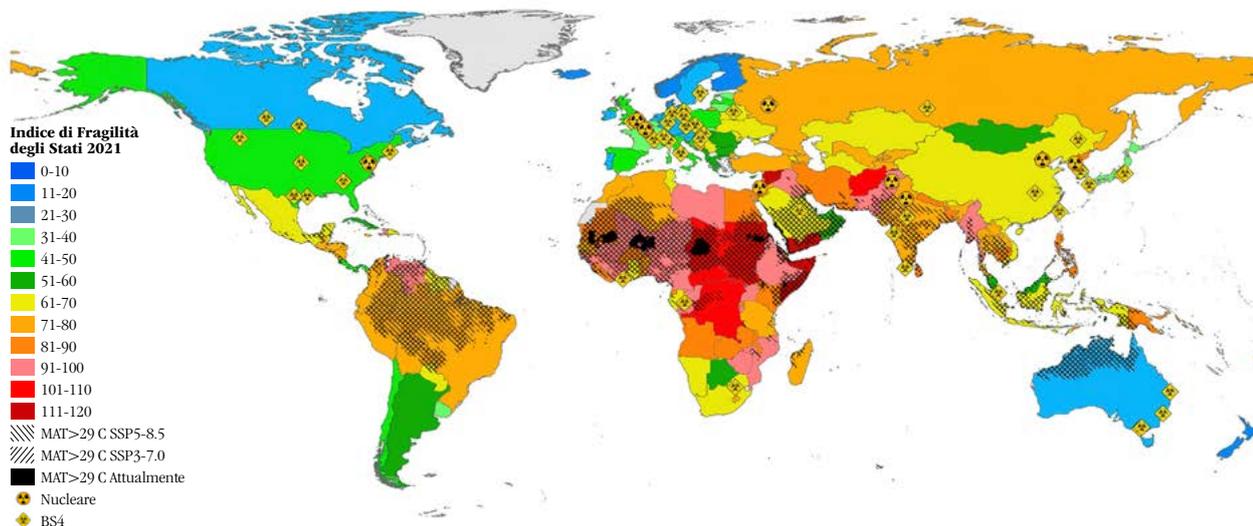
Le temperature estreme combinate con alti tassi di umidità possono influenzare negativamente la produttività di coloro che lavorano all'aperto e la resa delle principali coltivazioni di cereali. Queste condizioni di calore letale potrebbero colpire in maniera significativa le aree popolate nell'Asia meridionale e sudoccidentale (47).

La Figura 2 esamina un calore estremo da un punto di vista politico, sovrapponendo le proiezioni degli scenari SSP3-7.0 o SSP5-8.5 di una TMA >29°C intorno al 2070, e il Fragile States Index (una misurazione dell'instabilità degli stati). Colpisce la sovrapposizione degli stati attualmente vulnerabili e delle aree che in futuro subiranno un riscaldamento estremo. Se nei prossimi decenni non si porrà seriamente rimedio all'attuale fragilità politica, potrebbe crearsi una fascia di instabilità con gravi ramificazioni potenziali.

Infine, i cambiamenti climatici potrebbero minare irreparabilmente la possibilità per l'umanità di riprendersi da un altro cataclisma, come per una guerra nucleare. Potrebbero cioè creare significativi rischi latenti (Tabella 1): impatti magari gestibili in tempi di stabilità diventano terribili durante la reazione a, o la ripresa da, una catastrofe. Queste diverse cause di preoccupazione per una catastrofe sono correlate e devono essere esaminate contemporaneamente.



**Figura 1.** Sovrapposizione tra la distribuzione della popolazione e il calore estremo nel futuro. I dati del modello CMIP6 [da nove modelli GCM disponibili nel database WorldClim (45)] sono stati usati per calcolare la temperatura media annua (TMA) nello scenario SSP3-7.0 in un periodo intorno al 2070 (2060-2080) insieme alle proiezioni demografiche Shared SSP3 fino al 2070 circa (46). Le aree ombreggiate rappresentano le zone in cui la TMA supera i 29°C, mentre i colori nella topografia rappresentano le varie densità di popolazione.



**Figura 2.** Calore e fragilità: sovrapposizione tra la fragilità degli stati, il calore estremo e il pericolo di catastrofi nucleari e biologiche. I dati del modello GCM [dal database WorldClim (45)] sono stati utilizzati per calcolare i tassi di riscaldamento annuale medio negli scenari SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Questo si traduce in un aumento delle temperature di 2,8°C entro il 2070 circa (48) per lo scenario SSP3-7.0 e di 3,2°C per lo scenario SSP5-8.5. Le parti ombreggiate identificano regioni in cui la MAT supera i 29°C. Queste proiezioni sono sovrapposte con il Fragile State Index (FSI) (49). Questo è necessariamente un valore grezzo, perché il FSI stima solo i livelli di fragilità attuali. Sebbene le misurazioni della fragilità e della stabilità siano messe in discussione e hanno dei limiti, il FSI fornisce uno degli indici più solidi. La figura mostra anche le capitali degli stati con armi nucleari e la dislocazione dei laboratori di massimo contenimento Biosafety Level 4 (BS4), dove vengono maneggiati i patogeni più pericolosi al mondo. Questi vengono forniti come indicatore grezzo per il pericolo di catastrofi nucleari e biologiche.

## Definire i termini chiave

Sebbene gli scenari relativi ai casi peggiori rimangono poco esplorati nella letteratura scientifica, le affermazioni che etichettano i cambiamenti climatici come catastrofici non sono inconsuete. Il segretario generale delle Nazioni Unite, António Guterres, li ha definiti una “minaccia esistenziale”. Studi accademici avvertono che è probabile che un riscaldamento oltre i 5°C sia “più che catastrofico” (50) e che oltre i 6°C rappresenti “una indiscutibile catastrofe globale” (9).

L’attuale dibattito sulla catastrofe climatica è indebolito da una terminologia poco chiara. Il termine “cambiamenti climatici catastrofici” non è stato ancora definito in modo condiviso. Un rischio esistenziale è solitamente definito come un rischio che causa una perdita a lungo termine, duratura e significativa di potenziale umano (51, 52). La definizione esistente è profondamente ambigua e richiede un dibattito nella società nonché di definire quali siano i valori umani basilari, validi nel lungo termine. (52). Mentre un’esplorazione democratica dei valori è benvenuta, non è necessario conoscere i percorsi verso la catastrofe umana o l’estinzione della specie (52). Per ora la definizione esistente non fornisce solide fondamenta per un’indagine scientifica. Sugeriamo definizioni operative più chiare di tali termini nella Tabella 1, un primo passo nella creazione di un lessico per le calamità globali. Alcuni di questi termini, come quelli riferiti a ciò che costituisce un “rischio plausibile” o “contribuisce significativamente”, sono necessariamente ambigui.

Altri, come definire cosa sia una soglia del 10% o 25% della popolazione globale, sono parzialmente arbitrari (il 10% è inteso come una soglia per perdite con dei precedenti storici e il 25% inteso come una decrescita senza precedenti; vedere il *Materiale Supplementare* per approfondimenti). Occorrono ulteriori ricerche per affinare queste definizioni. Le soglie inerenti ai rischi globali di catastrofi e decimazioni sono intese a livello euristico generico e non come confini numerici. Anche altri fattori, come la morbilità e le perdite culturali ed economiche, devono essere considerati.

Noi definiamo il rischio come la probabilità che l’esposizione agli impatti e alle risposte dei cambiamenti climatici produca conseguenze avverse per i sistemi umani o ecologici. Nell’ambito del programma “Finale di partita sul clima” siamo particolarmente interessati alle conseguenze catastrofiche. Ogni rischio è composto da quattro fattori determinanti: pericolosità, esposizione, vulnerabilità e risposta (3). Abbiamo posto un riscaldamento globale di 3°C o più entro la fine del secolo come marcatore di cambiamenti climatici estremi. Questa soglia è stata scelta per quattro motivi: un tale aumento di temperatura supera abbondantemente gli obiettivi stabiliti a livello internazionale; inoltre, “motivi di preoccupazione” dell’IPCC sono classificati come rischio “alto” o “molto alto” tra i 2°C e i 3°C; ci sono sostanzialmente dei rischi maggiori di cambiamenti auto-amplificanti che renderebbero impossibile limitare il riscaldamento a 3°C; e questi livelli sono legati ad un’ancora maggiore incertezza sugli impatti.

**Tabella 1.** Definizione dei termini chiave nel programma “Finale di partita sul clima”.

Termine	Definizione
Rischio latente	Rischio inattivo in certe condizioni e attivo in altre.
Cascata di rischi	Catena di rischi che si verifica quando un impatto avverso innesca una serie di rischi collegati (3).
Rischio sistemico	Il potenziale per singole rotture o dissesti di ripercuotersi a cascata generando un crollo dell'intero sistema.
Cambiamenti climatici estremi	Aumento della temperatura superficiale media di 3°C o più entro il 2100.
Rischio di estinzione	Probabilità di un'estinzione della specie umana entro un determinato arco temporale.
Minaccia di estinzione	Un fattore plausibile e significativo che contribuisce al rischio di estinzione totale.
Fragilità di una società	Probabilità che danni minori interagiscano creando un rischio di catastrofe globale o di estinzione a causa delle vulnerabilità delle società, dei rischi a cascata e di risposte inadeguate.
Collasso della società	Una significativa frammentazione socio-politica e/o fallimento degli Stati insieme a una perdita di capitale e di identità del sistema relativamente rapida, duratura e significativa; può portare ad aumenti di mortalità e morbilità su larga scala.
Rischio di catastrofe globale	La probabilità di una perdita del 25% della popolazione globale e di gravi guasti ai sistemi essenziali globali (come quello alimentare) entro un certo arco temporale (anni o decenni).
Minaccia di catastrofe globale	Fattore plausibile che contribuisce significativamente al rischio di catastrofe globale; la probabilità che i cambiamenti climatici possano essere una minaccia di catastrofe globale può essere denominata “cambiamenti climatici catastrofici”.
Rischio di decimazione globale	La probabilità di una perdita del 10% (o più) della popolazione globale e gravissimi guasti ai sistemi globali essenziali (come quello alimentare) entro un certo arco temporale (anni o decenni).
Minaccia di decimazione globale	Un fattore plausibile che contribuisca significativamente al rischio di decimazione globale.
Territorio del finale di partita	Livelli di riscaldamento globale e di fragilità della società che con sufficiente probabilità possono rendere i cambiamenti climatici una minaccia di estinzione.
Caso peggiore di riscaldamento	Il più alto livello di riscaldamento plausibile empiricamente e teoricamente.

### Le ricerche fondamentali fino a oggi

I tentativi più accurati di studiare direttamente o esaminare in maniera esaustiva come i cambiamenti climatici potrebbero portare all'estinzione dell'umanità o a una catastrofe globale sono entrati in libri di divulgazione come *The Uninhabitable Earth* (53) e *Our Final Warning* (10). Quest'ultimo, un'analisi degli impatti climatici a diversi gradi, conclude che un aumento della temperatura globale di 6°C “metta in pericolo persino la sopravvivenza gli esseri umani come specie” (10).

Sappiamo che i rischi per la salute peggiorano con l'aumento delle temperature (54). Per esempio, a temperature più elevate c'è già una crescente probabilità di “tracollo delle regioni-granaio” (e conseguente impennata dei prezzi del cibo) (55). Per le quattro principali regioni produttrici di mais (responsabili dell'87% della produzione mondiale) la probabilità di perdite nella produzione superiori al 10% balza dal 7% annuale con un aumento di temperature di 2°C, all'86% con un aumento di 4°C (56). L'IPCC segnala, nel Sesto Rapporto di Valutazione, che tra il 50% e il 75% della popolazione globale potrebbe essere esposta a condizioni climatiche che ne minacciano l'esistenza entro la fine del secolo a causa di calore e umidità estremi (6). Altre informazioni sulle ricerche chiave riguardanti i cambiamenti climatici estremi sono riportate nel Materiale Supplementare.

I rapporti dell'IPCC riassumono una letteratura scientifica peer-reviewed riguardante i cambiamenti cli-

matici, gli impatti e la vulnerabilità, e la mitigazione. Nonostante nel contributo del Working Group 1 al Sesto Rapporto siano stati identificati 15 elementi potenzialmente instabili nella biosfera, negli oceani e nella criosfera, molti soggetti a soglie che determinano cambiamenti irreversibili, le pubblicazioni disponibili per valutare gli scenari catastrofici sono pochissime. La sintesi più rilevante sono i “motivi di preoccupazione” pubblicati a partire dal 2001 dal Working Group II dell'IPCC. Queste sintesi intendono fornire informazioni utili a determinare quale sia la “pericolosa interferenza di origine antropica” con il sistema climatico, che l'UNFCCC ha l'obiettivo di prevenire. Le cinque tipologie di preoccupazioni sono gli ecosistemi unici e minacciati; la frequenza e severità degli eventi climatici estremi; la distribuzione globale e l'equilibrio degli impatti; gli impatti economici ed ecologici totali; e le transizioni improvvise e irreversibili su larga scala. Ogni valutazione dell'IPCC ha rilevato maggiori rischi in corrispondenza di più bassi aumenti della temperatura media globale. Nel sesto Rapporto, i rischi per tutti e cinque i motivi di preoccupazione sono stati identificati come molto alti per un aumento delle temperature tra 1,2°C e 4,5°C. Nel Quinto Rapporto per lo stesso intervallo di temperature i rischi erano molto alti soltanto per due di questi (6). Ora rischi per le cinque categorie di preoccupazioni sono già “alti” o “molto alti” per un riscaldamento compreso tra 2°C e 3°C (57).

## Un esempio di programma di ricerca: stati estremi del sistema Terra, mortalità di massa, fragilità delle società e valutazioni integrate della catastrofe climatica

Suggeriamo un programma di ricerca per i cambiamenti climatici catastrofici che si concentri su quattro filoni chiave:

- Comprendere dinamiche e impatti a lungo termine dei cambiamenti climatici estremi.
- Esplorare i percorsi dipendenti dal clima in tema di morbilità e mortalità.
- Studiare la fragilità sociale: le vulnerabilità, i rischi a cascata e le risposte ai rischi.
- Sintetizzare i risultati della ricerca in “valutazioni integrate della catastrofe”.

Il programma trae informazioni e si basa sui modelli di valutazione integrata che sono stati adattati per valutare meglio i danni su larga scala. È già stato identificato un range di punti critici (58-60), con effetti che variano da un 10% di possibilità di raddoppiare i costi sociali del carbonio (61) fino a un aumento di otto volte del suo prezzo ottimale (60). Questo richiama risultati precedenti riguardanti l'influenza dei rischi estremi (31). Anche le assunzioni dei modelli influenzano fortemente i risultati, per esempio i tassi di sconto, i tassi di crescita esogena, la propensione al rischio e le funzioni di danno.

I modelli non comprendono aspetti vasti e importanti che vengono evidenziati nel programma di ricerca: gli impatti a lungo termine dei cambiamenti climatici estremi, i percorsi verso la morbilità e la mortalità di massa e i rischi a cascata e sistemici che gli impatti di un clima estremo potrebbero innescare. Un progresso in questi ambiti permetterebbe di avere modelli e funzioni di danno più realistici e contribuirebbe a fornire stime dirette delle vittime (62), nonché una misurazione morale non-economica del rischio. Sollecitiamo la comunità dei ricercatori a sviluppare modelli integrati concettuali e semiquantitativi delle catastrofi climatiche.

Infine, invitiamo altri studiosi a esaminare e migliorare il programma che proponiamo.

### *Stati estremi del sistema Terra*

Dobbiamo comprendere gli stati potenziali a lungo termine del sistema Terra in caso di cambiamenti climatici estremi. Questo significa mappare differenti scenari di “Terra serra surriscaldata” (21) o altri scenari estremi come regimi di circolazione alternativi o ampi e irreversibili cambiamenti della copertura glaciale e del livello dei mari. Questa ricerca richiederà di tenere in considerazione le dinamiche climatiche a

lungo termine e i loro impatti su altri processi a livello planetario. Le ricerche indicano che i precedenti eventi di estinzione di massa si verificarono a causa degli effetti del superamento di una soglia nel ciclo del carbonio che noi potremmo superare nel corso di questo secolo (40, 63). Gli impatti che hanno avuto un ruolo chiave nelle precedenti estinzioni di massa, come l'ipossia e l'anossia degli oceani, potrebbero intensificarsi sul più lungo periodo (40, 64).

Studiare i potenziali punti critici e i cambiamenti irreversibili “obbligati” del sistema climatico ed ecologico è essenziale. Per esempio, i modelli della calotta glaciale antartica indicano diversi punti critici che mostrano isteresi (65). Si è scoperto che a circa 2°C di riscaldamento globale si innesca la perdita irreversibile della calotta glaciale antartica occidentale, e l'attuale configurazione della calotta non potrebbe essere ripristinata nemmeno se le temperature tornassero ai livelli attuali. Con un aumento della temperatura globale tra 6°C e 9°C potrebbe iniziare una lenta e irreversibile perdita della calotta glaciale antartica orientale, con un innalzamento del livello del mare di oltre 40 metri (65). Sarebbero utili anche studi analoghi sulla calotta glaciale della Groenlandia, il permafrost e la vegetazione terrestre. Identificare tutti i potenziali elementi critici del sistema Terra è fondamentale, tenendo conto dei più ampi confini planetari, come la biodiversità che influenzerà i punti critici (66), i feedback esterni al sistema climatico, e come gli elementi critici possano ripercuotersi a cascata l'uno sull'altro (67).

### *Morbilità e mortalità di massa*

I potenziali fattori che contribuiscono alla morbilità e alla mortalità indotte dal clima sono molti, ma è probabile che i “quattro cavalieri” del “finale di partita sul clima” siano la fame e la malnutrizione, gli eventi climatici estremi, i conflitti, e le malattie trasmesse da vettori. Saranno aggravati da ulteriori impatti come la mortalità dovuta all'inquinamento dell'aria e l'innalzamento del livello del mare. Questi andamenti richiedono ulteriori studi. Persino il calcolo empirico delle vittime dirette di stress termico è così impegnativo che negli Stati Uniti sono sistematicamente sottostimate (68). Una valutazione della letteratura su salute e cambiamenti climatici dal 1985 al 2013 (con una revisione sommaria fino al 2017) ha mostrato che su 2.143 articoli solo 189 (il 9%) comprendevano una discussione dedicata a impatti più estremi sulla salute o a rischi sistemici (legati a migrazioni, fame o conflitti) (69). I modelli raramente includono anche risposte adattative. Quindi le stime globali sulla mortalità sono incerte.

Come è possibile valutare meglio il fattore della morbilità e della mortalità di massa? 1) Identificando i pe-

ricoli composti attraverso modellizzazioni del basso dei sistemi e delle vulnerabilità (70) e rigorosi stress test sul grado di preparazione (71). 2) Applicando i modelli a scenari con temperature più elevate e periodi temporali più lunghi. 3) Integrando i rischi a cascata e i rischi sistemici (vedere la sezione seguente) nella valutazione dei rischi per la salute, per esempio incorporando la morbilità e la mortalità risultanti da un'impennata dei prezzi dei generi alimentari.

### *Fragilità della società: vulnerabilità, rischi a cascata e risposte ai rischi*

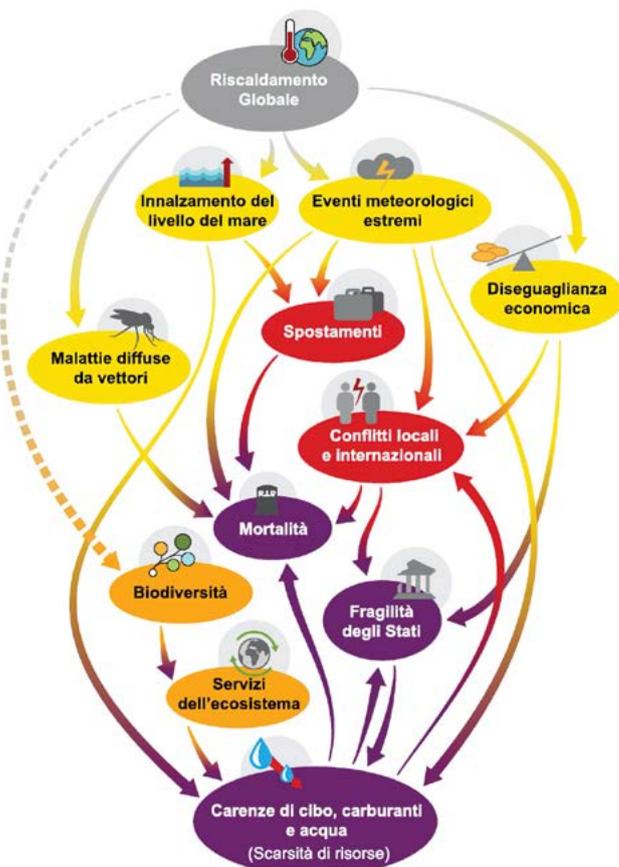
Le valutazioni del rischio più complesse sono generalmente più realistiche. I fattori determinanti del rischio non sono solo i pericoli, le vulnerabilità e le esposizioni, ma anche le risposte (3, 72). Una valutazione del rischio completa deve considerare gli impatti del clima, l'esposizione differenziata, le vulnerabilità sistemiche, le risposte delle società e degli attori e gli effetti a catena nelle varie nazioni e nei vari settori (73), che potrebbero potenzialmente portare a crisi sistemiche. Nei casi peggiori un effetto domino a spirale potrebbero aggravare continuamente il rischio iniziale.

I rischi a cascata per le società potrebbero comprendere conflitti, malattie e cambiamenti politici, e crisi economiche. I cambiamenti climatici hanno una relazione complessa con i conflitti, e tra i ruoli che potrebbero ricoprire c'è probabilmente quello di fattore di rischio (74), specialmente nelle zone di preesistenti conflitti etnici (75). Potrebbero influenzare la diffusione e la trasmissione di malattie infettive, come anche la propagazione e la gravità di diverse infezioni zoonotiche (76), creando le condizioni per nuovi focolai e infezioni (6, 77). Le epidemie possono, a loro volta, causare impatti a cascata, come nel caso del COVID-19. L'esposizione a stress ecologici e disastri naturali è un fattore determinante per la "tenuta" culturale delle società (rigorosità delle regole, rispetto della tradizione e severità delle punizioni) (78). La letteratura riguardante i danni economici mediati causati dai cambiamenti climatici è abbondante, ma non lo è altrettanto quella sui rischi estremi finanziari, come la possibilità di crisi finanziarie globali.

Si potrebbe attingere a studi passati per esaminare i rischi per la società. Cambiamenti climatici regionali relativamente piccoli sono stati collegati a trasformazioni e persino al collasso di società del passato (79, 80), forse per una diminuzione della loro resilienza e il superamento di punti critici. Ci sono alcune evidenze di rallentamenti cruciali nelle società prima del loro collasso (81, 82). Però bisogna essere attenti nel trarre delle lezioni da casi di studio premoderni. La preistoria e la storia dovrebbero essere studiate per determinare non solo come le società del passato so-

no state influenzate da specifici pericoli climatici, ma come questi effetti differiscono col cambiare delle società, per esempio per quanto riguarda la densità della popolazione, la disuguaglianza nella distribuzione della ricchezza e il regime di governance. Un tale contesto permetterà di esaminare le società passate e attuali mediante un solo sistema di analisi (37).

Nel lavoro sulla sensibilità delle società dovranno essere considerate le caratteristiche e le vulnerabilità di un mondo moderno e globalizzato, nel quale il sistema alimentare e dei trasporti possono assorbire shock. Sistemi così grandi e interconnessi hanno già delle fonti di fragilità intrinseche, in particolare se le reti sono relativamente omogenee, con pochi nodi dominanti altamente connessi a tutti gli altri (83). Altre importanti vulnerabilità attuali comprendono la rapida diffusione della cattiva informazione e della disinformazione. Questi rischi epistemici creano serie preoccupazioni per le crisi della sanità pubblica (84) e hanno già ostacolato l'azione climatica. La Figura 3 è una rappresentazione semplificata di alto livello di come si propagano i rischi a cascata.



**Figura 3.** Fattori di tracollo a cascata nel clima globale. Questo è un diagramma a loop causale nel quale una linea completa rappresenta una polarità positiva (per esempio, un feedback amplificante, non necessariamente positivo in senso normativo) e una linea tratteggiata denota una polarità negativa (cioè un feedback mitigante). Si rimanda al materiale supplementare per gli approfondimenti.

### Valutazione integrata della catastrofe

I cambiamenti climatici produrranno un mondo con cambiamenti in ecosistemi, nella geopolitica e nella tecnologia. Potremmo addirittura vedere “guerre calde” – conflitti tra grandi potenze amplificati dalla tecnologia per contendersi budget di carbonio sempre più ridotti, impatti climatici o esperimenti di gestione della radiazione solare? Simili sviluppi e scenari devono essere tenuti in considerazione per comporre un’immagine completa dei pericoli legati al clima. I cambiamenti climatici potrebbero rafforzare altre minacce che interagiscono tra loro, compresi un aumento della disuguaglianza, gli stress demografici, la cattiva informazione, nuove armi di distruzione e il superamento dei limiti planetari (85). Ci sono anche shock naturali, come eruzioni solari ed eruzioni vulcaniche ad alto impatto che presentano possibili sincronismi letali (86). È di importanza vitale studiarli, e una serie di “scenari catastrofici standardizzati” faciliterebbe la valutazione.

L’analisi sistematica del parere degli esperti, la mappatura dei sistemi e gli scenari partecipativi sono strumenti promettenti per capire queste ripercussioni a cascata (73). Per alcune di queste aree di interesse esistono progetti di ricerca che potrebbero essere finanziati (87).

L’approccio all’integrazione può essere di vario tipo. Le meta-analisi e le sintesi dei risultati delle ricerche potrebbero fornire dati utili per mappare le interazioni tra i rischi attraverso una mappatura causale, l’analisi dei pareri degli esperti e mediante approcci modellistici basati di dinamica dei sistemi. Un recente studio ha mappato le evidenze della relazione tra cambiamenti climatici, insicurezza alimentare e contributi al collasso della società (mortalità, conflitti ed emigrazione) basandosi su 41 studi (88).

Una strada particolarmente promettente è quella di riproporre i modelli complessi esistenti per studiare i rischi a cascata. La rete che ne risulta potrebbe essere valutata mediante uno “stress test” con scenari catastrofici standardizzati. Questo consentirebbe di valuta-

re quali settori possono subire crisi di approvvigionamento, tracolli, o risposte drastiche (come il divieto di esportare generi alimentari). Sono stati sviluppati dei modelli complessi per aiutare a comprendere i disastri sistemici su larga scala del passato, come la crisi finanziaria globale del 2007-2008 (89): alcuni di essi potrebbero essere riconfigurati per esplorare la natura potenziale di una crisi climatica globale.

È improbabile che un crollo dei sistemi si verifichi simultaneamente su scala globale; è più probabile che si verifichi a livello regionale e si propaghi a cascata. Sebbene l’obiettivo sia quello di studiare i rischi di una catastrofe climatica a livello globale, è indispensabile incorporare la conoscenza sui danni a livello regionale.

I rischi potenzialmente catastrofici legati ai cambiamenti climatici sono difficili da quantificare, persino all’interno dei modelli. Ogni forma di modellizzazione che abbiamo menzionato potrebbe fornire una migliore comprensione dei percorsi del rischio sistemico, e suggerire linee guida probabilistiche approssimative. Eppure, a partire dai risultati si potrebbero sviluppare strumenti argomentativi per valutare il potenziale di sviluppi catastrofici a vari livelli di aumento della temperatura (90). Sarebbero strumenti da inserire in metodi deliberativi aperti e democratici con un approccio equo, inclusivo ed efficace al processo decisionale (91). Approcci simili potrebbero avvalersi dei processi decisionali in condizioni di incertezza, come il principio di minimizzazione della massima perdita possibile o ordinare le decisioni sulla base della somma pesata dei migliori e peggiori risultati, come suggerito nella rassegna sulla biodiversità di Dasgupta (92).

### Un Rapporto Speciale dell’IPCC sui cambiamenti climatici catastrofici

L’IPCC deve ancora concentrare la sua attenzione sui cambiamenti climatici catastrofici. Nessuno dei 14 rapporti speciali pubblicati finora se n’è occupato. Per il settimo ciclo di valutazione dell’IPCC è stato proposto un rapporto speciale sui “punti critici”, e noi suggeriamo di ampliarlo a tutti gli aspetti fondamentali dei cambiamenti climatici catastrofici, come sembra possibile dalla procedura decisionale dell’IPCC (93). Un simile rapporto potrebbe studiare come i feedback del sistema Terra potrebbero alterare le traiettorie delle temperature, e se queste alterazioni siano irreversibili.

Potrebbe altresì contribuire a stimolare ulteriori ricerche, proprio come successe con il rapporto speciale “Global warming of 1.5 °C” (94) che aveva suscitato nell’opinione pubblica un’ondata di preoccupazione per la gravità degli impatti causati da variazioni più basse della temperatura. L’impatto di un rapporto sui cambiamenti climatici catastrofici potrebbe essere an-

Foto: Image by Hans from Pixabay



cora più marcato. Potrebbe richiamare l'attenzione sulla posta in gioco con gli scenari peggiori. È fondamentale un finanziamento per la ricerca sui cambiamenti climatici peggiori e catastrofici.

Sarà fondamentale anche la comunicazione efficace dei risultati della ricerca. I messaggi che fanno paura possono essere controproducenti e indurre una paralisi (95), ma l'evidenza riguardo ai messaggi di speranza rispetto a quelli di paura è incerta, persino nelle meta-analisi (96, 97). Il ruolo delle emozioni è complesso, ed è necessario adeguare il messaggio ai diversi tipi di pubblico a cui è rivolto (98). Una rassegna recente del dibattito sul clima ha evidenziato l'importanza di evitare polarizzazioni politiche, di selezionare messaggeri affidabili e di scegliere contesti efficaci (99). Questo tipo di considerazioni sarà fondamentale per assicurare una discussione civica utile e accurata.

### Riferimenti bibliografici

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. B. Field et al., Eds. (Cambridge University Press, 2014).
2. F. U. Jehn, M. Schneider, J. R. Wang, L. Kemp, L. Breuer, Betting on the best case: Higher end warming is underrepresented in research. *Environ. Res. Lett.* 16, 084036 (2021).
3. N. P. Simpson et al., A framework for complex climate change risk assessment. *One Earth* 4, 489-501 (2021).
4. T. Matthews, R. L. Wilby, C. Murphy, An emerging tropical cyclone-deadly heat compound hazard. *Nat. Clim. Chang.* 9, 602-606 (2019).
5. C. A. Phillips et al., Compound climate risks in the COVID-19 pandemic. *Nat. Clim. Chang.* 10, 586-588 (2020).
6. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, H.O. Pörtner et al., Eds. (Cambridge University Press, 2022).
7. K. Brysse, N. Oreskes, J. O'Reilly, M. Oppenheimer, Climate change prediction: Erring on the side of least drama? *Glob. Environ. Change* 23, 327-337 (2013).
8. M. Oppenheimer et al., *Discerning Experts: The Practices of Scientific Assessment for Environmental Policy* (University of Chicago Press, 2019).
9. G. Wagner, M. L. Weitzman, *Climate Shock: The Economic Consequences of a Hotter Planet* (Princeton University Press, 2015).
10. M. Lynas, *Our Final Warning: Six Degrees of Climate Emergency* (Harper Collins, 2020).
11. P. R. Liu, A. E. Raftery, Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 °C target. *Commun. Earth Environ.* 2, 1-29 (2021).
12. Climate Action Tracker, 2100 warming projections. Climate Action Tracker. Accessed 1 March 2022. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures>.
13. M. Willeit, A. Ganopolski, R. Calov, V. Brovkin, Mid-Pleistocene transition in glacial cycles explained by declining CO<sub>2</sub> and regolith removal. *Sci. Adv.* 5, eaav7337 (2019).
14. V. Masson-Delmotte et al., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, 2021).
15. S. M. Natali et al., Large loss of CO<sub>2</sub> in winter observed across the northern permafrost region. *Nat. Clim. Chang.* 9, 852-857 (2019).
16. Y. Yang et al., Post-drought decline of the Amazon carbon sink. *Nat. Commun.* 9, 3172 (2018).

### Conclusioni

Ci sono molte evidenze del fatto che i cambiamenti climatici potrebbero diventare catastrofici e che potremmo entrare nella fase "finale di partita" anche con livelli modesti di riscaldamento. Capire i rischi estremi è importante per un processo decisionale robusto, dalla preparazione alla considerazione delle risposte di emergenza. Questo richiede di esplorare non solo gli scenari con temperature più alte, ma anche la possibilità che gli impatti climatici contribuiscano a rischi sistemici e a rischi a cascata. Pensiamo che sia giunto il momento di analizzare seriamente i modi migliori per espandere i nostri orizzonti di ricerca al fine di coprire tutto questo campo. Affrontare un futuro di cambiamenti climatici in accelerazione senza guardare agli scenari dei casi peggiori è, se va bene, una gestione ingenua del rischio, e se va male una follia letale. ■

17. M. R. Raupach et al., The declining uptake rate of atmospheric CO<sub>2</sub> by land and ocean sinks. *Biogeosciences* 11, 3453-3475 (2014).
18. W. Hubau et al., Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* 579, 80-87 (2020).
19. V. Brovkin et al., Past abrupt changes, tipping points and cascading impacts in the Earth system. *Nat. Geosci.* 14, 550-558 (2021).
20. A. K. Klose, N. Wunderling, R. Winkelmann, J. F. Donges, What do we mean, 'tipping cascade'? *Environ. Res. Lett.* 16, 125011 (2021).
21. W. Steffen et al., Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 8252-8259 (2018).
22. M. Popp, H. Schmidt, J. Marotzke, Transition to a moist greenhouse with CO<sub>2</sub> and solar forcing. *Nat. Commun.* 7, 10627 (2016).
23. T. Schneider, C. M. Kaul, K. G. Pressel, Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming. *Nat. Geosci.* 12, 163-167 (2019).
24. S. C. Sherwood et al., An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Rev. Geophys.* 58, e2019RG000678 (2020).
25. C. R. Schwalm, S. Glendon, P. B. Duffy, RCP8.5 tracks cumulative CO<sub>2</sub> emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, 19656-19657 (2020).
26. Z. Hausfather, G. P. Peters, Emissions—The 'business as usual' story is misleading. *Nature* 577, 618-620 (2020).
27. P. Christensen, K. Gillingham, W. Nordhaus, Uncertainty in forecasts of long-run economic growth. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 5409-5414 (2018).
28. H. Kunreuther et al., Risk management and climate change. *Nat. Clim. Chang.* 3, 447-450 (2013).
29. F. H. Knight, Risk, Uncertainty and Profit (Hart, Schaffner and Marx, 1921).
30. R. Dittrich, A. Wreford, D. Moran, A survey of decision-making approaches for climate change adaptation: Are robust methods the way forward? *Ecol. Econ.* 122, 79-89 (2016).
31. S. Dietz, High impact, low probability? An empirical analysis of risk in the economics of climate change. *Clim. Change* 108, 519-541 (2011).
32. M. L. Weitzman, Fat-tailed uncertainty in the economics of catastrophic climate change. *Rev. Environ. Econ. Policy* 5, 275-292 (2011).
33. T. M. Lenton, Early warning of climate tipping points. *Nat. Clim. Chang.* 1, 201-209 (2011).
34. A. Jordan et al., Going beyond two degrees? The risks and opportunities of alternative options. *Clim. Policy* 13, 751-769 (2013).
35. C. Field et al., Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance (National Academies Press, 2021).
36. A. Tang, L. Kemp, A fate worse than warming? Stratospheric aerosol injection and catastrophic risk. *Front. Clim. Sci.* 3, 1-17 (2021).
37. T. A. Kohler, M. Rockman, The IPCC: A primer for archaeologists. *Am. Antiq.* 85, 627-651 (2020).
38. P. Brannen, The Ends of the World: Volcanic Apocalypses, Lethal Oceans, and Our Quest to Understand Earth's Past Mass Extinctions (Ecco, 2017).
39. D. H. Rothman, Characteristic disruptions of an excitable carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 14813-14822 (2019).
40. D. H. Rothman, Thresholds of catastrophe in the Earth system. *Sci. Adv.* 3, e1700906 (2017).
41. K. D. Burke et al., Pliocene and Eocene provide best analogs for near-future climates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 13288-13293 (2018).
42. P. J. Richerson, R. Boyd, R. L. Bettinger, Was agriculture impossible during the Pleistocene but mandatory during the Holocene? A climate change hypothesis. *Am. Antiq.* 66, 387-411 (2001).
43. C. Xu, T. A. Kohler, T. M. Lenton, J. C. Svenning, M. Scheffer, Future of the human climate niche. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 117, 11350-11355 (2020).
44. T. Homer-Dixon et al., Synchronous failure: The emerging causal architecture of global crisis. *Ecol. Soc.* 20, 6 (2015).
45. WorldClim, WorldClim-Global Climate Data: Free climate data for ecological modeling and GIS. Accessed 17 December 2020. <https://www.worldclim.com/node/1>.
46. International Institute for Applied Systems Analysis, SSP Database (shared socioeconomic pathways) (Version 2.0). Accessed 17 December

2020. <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>.
47. J. S. Pal, E. A. B. Eltahir, Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nat. Clim. Chang.* 6, 197-200 (2016).
  48. M. Meinshausen et al., The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change* 109, 213-241 (2011).
  49. Fund for Peace, Fragile States Index 2021. Accessed 12 April 2022. <https://fragilestatesindex.org/>.
  50. Y. Xu, V. Ramanathan, Well below 2 °C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114, 10315-10323 (2017).
  51. T. Ord, *The Precipice: Existential Risk and the Future of Humanity* (Bloomsbury, 2020).
  52. C. Z. Cremer, L. Kemp, Democratising risk: In search of a methodology to study existential risk. SSRN [Preprint] (2021). Accessed 1 March 2022. <https://ssrn.com/abstract=3995225>.
  53. D. Wallace-Wells, *The Uninhabitable Earth* (Crown, 2019).
  54. K. L. Ebi et al., Health risks of warming of 1.5°C, 2°C, and higher, above pre-industrial temperatures. *Environ. Res. Lett.* 13, 063007 (2018).
  55. F. Gaupp, J. Hall, S. Hochrainer-Stigler, S. Dadson, Changing risks of simultaneous global breadbasket failure. *Nat. Clim. Chang.* 10, 54-57 (2020).
  56. M. Tigchelaar, D. S. Battisti, R. L. Naylor, D. K. Ray, Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115, 6644-6649 (2018).
  57. Z. Zommers et al., Burning embers: Towards more transparent and robust climate-change risk assessments. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 516-529 (2020).
  58. S. Dietz, J. Rising, T. Stoerk, G. Wagner, Economic impacts of tipping points in the climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2103081118 (2021).
  59. T. S. Lontzek, Y. Cai, K. L. Judd, T. M. Lenton, Stochastic integrated assessment of climate tipping points indicates the need for strict climate policy. *Nat. Clim. Chang.* 5, 441-444 (2015).
  60. Y. Cai, T. M. Lenton, T. S. Lontzek, Risk of multiple interacting tipping points should encourage rapid CO2 emission reduction. *Nat. Clim. Chang.* 6, 520-528 (2016).
  61. M. Lenzen et al., The Global MRIO Lab—Charting the world economy. *Econ. Syst. Res.* 29, 158-186 (2017).
  62. J. Nolt, Casualties as a moral measure of climate change. *Clim. Change* 130, 347-358 (2015).
  63. D. H. Rothman, Characteristic disruptions of an excitable carbon cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 14813-14822 (2019).
  64. J. L. Penn, C. Deutsch, J. L. Payne, E. A. Sperling, Temperature-dependent hypoxia explains biogeography and severity of end-permian marine mass extinction. *Science* 362, eaat1327 (2018).
  65. J. Garbe, T. Albrecht, A. Levermann, J. F. Donges, R. Winkelmann, The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet. *Nature* 585, 538-544 (2020).
  66. J. Rockström et al., Opinion: We need biosphere stewardship that protects carbon sinks and builds resilience. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2115218118 (2021).
  67. N. Wunderling, J. F. Donges, J. Kurths, R. Winkelmann, Interacting tipping elements increase risk of climate domino effects under global warming. *Earth Syst. Dyn.* 12, 601-619 (2021).
  68. K. R. Weinberger, D. Harris, K. R. Spangler, A. Zanobetti, G. A. Wellenius, Estimating the number of excess deaths attributable to heat in 297 United States counties. *Environ. Epidemiol.* 4, e096 (2020).
  69. C. D. Butler, Climate change, health and existential risks to civilization: A comprehensive review (1989-2013). *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2266 (2018).
  70. J. Zscheischler et al., Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Chang.* 8, 469-477 (2018).
  71. K. L. Ebi et al., Stress testing the capacity of health systems to manage climate change-related shocks and stresses. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 15, 2370 (2018).
  72. A. Reisinger et al., “The concept of risk in the IPCC Sixth Assessment Report: A summary of cross-working group discussions” (International Panel on Climate Change, 2020).
  73. A. J. Challinor et al., Transmission of climate risks across sectors and borders. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 376, 20170301 (2018).

74. K. J. Mach et al., Climate as a risk factor for armed conflict. *Nature* 571, 193-197 (2019).
75. C.F. Schleussner, J. F. Donges, R. V. Donner, H. J. Schellnhuber, Armed-conflict risks enhanced by climate-related disasters in ethnically fractionalized countries. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 9216-9221 (2016).
76. R. Rupasinghe, B. B. Chomel, B. Martinez-López, Climate change and zoonoses: A review of the current status, knowledge gaps, and future trends. *Acta Trop.* 226, 106225 (2022).
77. R. Gibb, L. H. V. Franklinos, D. W. Redding, K. E. Jones, Ecosystem perspectives are needed to manage zoonotic risks in a changing climate. *BMJ* 371, m3389 (2020).
78. M. J. Gelfand et al., Differences between tight and loose cultures: A 33-nation study. *Science* 332, 1100-1104 (2011).
79. E. H. Cline, 1177 B.C.: The Year Civilization Collapsed: Revised and Updated (Princeton University Press, 2021).
80. D. D. Zhang et al., Climatic change, wars and dynastic cycles in China over the last millennium. *Clim. Change* 76, 459-477 (2006).
81. M. Scheffer, E. H. van Nes, D. Bird, R. K. Bocinsky, T. A. Kohler, Loss of resilience preceded transformations of pre-Hispanic Pueblo societies. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118, e2024397118 (2021).
82. M. Scheffer, Anticipating societal collapse; Hints from the Stone Age. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 10733-10735 (2016).
83. M. Scheffer et al., Anticipating critical transitions. *Science* 338, 344-348 (2012).
84. L. Kemp et al., Emerging Technologies and Dual-Use Concerns: A Horizon Scan for Global Public Health (World Health Organization, 2021).
85. W. Steffen et al., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 736-748 (2015).
86. L. Mani, A. Tzachor, P. Cole, Global catastrophic risk from lower magnitude volcanic eruptions. *Nat. Commun.* 12, 4756 (2021).
87. K. J. Mach et al., Directions for research on climate and conflict. *Earths Futur.* 8, EF001532 (2020).
88. C. E. Richards, R. C. Lupton, J. M. Allwood, Reframing the threat of global warming: An empirical causal loop diagram of climate change, food insecurity and societal collapse. *Clim. Change* 164, 49 (2021).
89. F. Caccioli, P. Barucca, T. Kobayashi, Network models of financial systemic risk: A review. *J. Comput. Soc. Sci.* 1, 81-114 (2018).
90. S. O. Hansson, G. Hirsch Hadorn, Eds., The Argumentative Turn in Policy Analysis: Reasoning about Uncertainty (Springer International, 2016).
91. H. Landemore, Open Democracy: Reinventing Popular Rule for the Twenty-First Century (Princeton University Press, 2020).
92. P. Dasgupta, The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review (HM Treasury, 2021).
93. Intergovernmental Panel on Climate Change, "Decision framework for special reports, methodology reports and technical papers (amended in September 2008)" (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008).
94. Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming of 1.5 °C (Cambridge University Press, 2021).
95. M. Hulme, Is it too late (to stop dangerous climate change)? An editorial. *WIREs Clim. Chang.* 11, e619 (2019).
96. G.J. Y. Peters, R. A. C. Ruiter, G. Kok, Threatening communication: A critical re-analysis and a revised meta-analytic test of fear appeal theory. *Health Psychol. Rev.* 7, S8-S31 (2013).
97. M. B. Tannenbaum et al., Appealing to fear: A meta-analysis of fear appeal effectiveness and theories. *Psychol. Bull.* 141, 1178-1204 (2015).
98. D. A. Chapman, B. Lickel, E. M. Markowitz, Reassessing emotion in climate change communication. *Nat. Clim. Chang.* 7, 850-852 (2017).
99. R. M. Colvin et al., Learning from the climate change debate to avoid polarisation on negative emissions. *Environ. Commun.* 14, 23-35 (2019).

## Ringraziamenti

Copyright © 2022 gli Autori. Pubblicato l'1 agosto 2022 da PNAS. Questo articolo open access è distribuito sotto licenza Creative Commons Attribution License 4.0 (CC BY). Traduzione di Erminio Cella. Revisione di Sylvie Coyaud e Stefano Caserini.

Il materiale supplementare è disponibile online all'indirizzo

<http://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.2108146119/-/DCSupplemental>

IdA





# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2022 è sostenuta da:





REPUBBLICA ITALIANA  
MINISTERO DELL'INTERNO

CA06621KF

CARTA DI IDENTITÀ / IDENTITY CARD

COMUNE DI / MUNICIPALITY  
LECCE

COGNOME / SURNAME

CARDUCCI

NOME / NAME

MICHELE

LUOGO E DATA DI NASCITA  
PLACE AND DATE OF BIRTH

LECCE (LE) 22.09.1963

SESSO  
SEX

M

STATURA  
HEIGHT

184

CITTADINANZA  
NATIONALITY

ITA

EMISSIONE / ISSUING  
14.10.2021

SCADENZA / EXPIRY  
22.09.2032

FIRMA DEL TITOLARE  
HOLDER'S SIGNATURE



