

SCHEDA 13

I NESSI CAUSALI TRA MANIFESTAZIONI DELL'EMERGENZA CLIMATICA E IMPATTI SULLA CONDIZIONE UMANA

SOMMARIO: Esistenza di causalità complesse, ma non per sovrapposizione; - I *causal loop diagram* e le linee di accertamento causale; - La confidenza sull'esistenza dei nessi causali; - La scienza dell'attribuzione e della perdita e danno.

(Tutti i documenti sono linkabili)

ESISTENZA DI CAUSALITÀ COMPLESSE, MA NON PER SOVRAPPOSIZIONE

L'osservazione dei nessi causali tra manifestazioni dell'emergenza climatica e impatti sulla condizione umana presuppone la considerazione del carattere complesso del sistema climatico (McMichael *et al.* (eds), *Climate Change and Human Health: Risks and Responses*, WHO, WMO, UNEP, 2003).

In estrema sintesi, la denotazione della causalità all'interno del sistema climatico, di cui è parte lo stesso essere umano, impone l'osservazione non solo delle determinazioni temporali tra un prima e un dopo, ma anche del processo di propagazione di interazioni circolari che ammettono causazioni "all'indietro" (*backward causation*) o "coesistenti" (*concurrent causation*).

In merito, si parla di propagazione biogeofisica a scale spaziotemporali plurime, dato che le singole sfere del sistema climatico, inclusa la biosfera comprensiva dell'essere umano, conoscono tempi di azione e reazione fra loro diversi (Pielke, Peters, Niyogi, *Ecology and Climate of the Earth. The Same Biogeophysical System*, in *Climate*, 10, 2022, 25).

Tale propagazione riguarda:

- le interazioni e i *feedback* tra le varie componenti del sistema climatico;
- le interazioni e i *feedback* tra le componenti del sistema climatico e la biosfera, in quanto quest'ultima coinvolge porzioni dell'atmosfera, della litosfera e dell'idrosfera;
- le interazioni tra la biosfera e le popolazioni, compresa quella umana, che la vivono;
- le interazioni all'interno di ciascuna popolazione;
- gli impatti delle interazioni precedenti su ciascun singolo individuo.

I percorsi causali, quindi, sono molto numerosi e articolati, operando come una rete di connessioni che non si esaurisce in un'unica dinamica tra una sola causa con un solo effetto né può essere ridotta a una sola dimensione di osservazione del rischio (Helbing, *Globally networked risks and how to respond*, in *Nature*, 497, 2013, 51-59).

Questo, però, non implica che si debba qualificare la causalità secondo la logica osservazionale della sovrapposizione.

Il c.d. "principio di sovrapposizione" presume che l'effetto di una somma di fattori causativi in ingresso sia uguale alla somma degli effetti prodotti da ogni singola causa. Questa rappresentazione è tipica della causalità meccanica, insufficiente per l'osservazione della complessità dell'intero sistema climatico (Fieguth, *An introduction to complex systems. Society, Ecology and nonlinear Dynamics*, Cham, 2021²).

I sistemi complessi non sono comprensibili per mezzo dell'analisi delle loro parti, perché le proprietà dei sistemi non sono intrinseche nelle parti, ma caratteristiche che emergono solo dalle relazioni fra esse (Runge, Petoukhov, Donges, *et al.*, *Identifying causal gateways and mediators in complex spatio-temporal systems*, in *Nature Communications*, 6, 2015, 8502, e cfr. la piattaforma *causeme*, su cui Runge, Bathiany, Bollt *et al.*, *Inferring causation from time series in Earth system sciences*, in *Nature Communications*, 10, 2019, 2553).

In tale prospettiva, tra l'altro, si collocano:

- la qualificazione della condizione umana come *One Health*, comprensiva, perché dipendente, della *planetary health* e non solo dei determinanti della salute umana;
- le analisi sui c.d. "impatti a cascata" del cambiamento climatico, appunto come rete di interazioni che si influenzano reciprocamente (Lawrence, Blackett, Craddock-Henry, *Cascading climate change impacts and implications*, in *Climate Risk Management*, 29, 2020, 100234);
- l'approccio sindemico alla salute umana, comprensivo della considerazione delle interazioni non solo medico-epidemiologiche tra ambiente e condizione individuale, ma tra ecosistema naturale e sociale in cui ciascun individuo vive (PMAC, *Protecting and improving human and planetary health. A syndemic view*, 2021).

Nella medesima prospettiva si spiega altresì il recente Rapporto ONU-EHS, *Interconnected disaster Risk 2020-2021*, che descrive le interconnessioni locali-planetarie-locali dei rischi nell'era dell'emergenza climatica, per concludere che gli impatti sulla condizione umana condividono le stesse cause, a partire dall'aumento delle concentrazioni di gas serra determinate dalle emissioni antropogeniche, da cui dipende la destabilizzazione di tutte le sfere dell'intero sistema climatico e non solo dell'atmosfera.

In ogni caso, l'interazione complessa del sistema climatico e tra sistema climatico e condizione umana è ora suffragata dall'AR6 Wg2 dell'IPCC (*Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*), pubblicato nel febbraio 2022, dove chiaramente e inequivocabilmente si parla di interazioni accoppiate tra sistema climatico, ecosistemi (compresa la loro biodiversità), società umana e si chiarisce, con livelli di confidenza scientifica alta, che queste interazioni sono alla base dei rischi emergenti dalle concentrazioni di gas serra prodotte dalle emissioni antropogeniche, generando perdite e danni per la società umana, nel degrado reciproco delle condizioni di stabilità del sistema climatico, degli ecosistemi e della loro biodiversità, della salute umana in tutte le sue componenti di benessere psico-fisico ed eco-sociale.

I CAUSAL LOOP DIAGRAM E LE LINEE DI ACCERTAMENTO CAUSALE

In ragione di tale complessità di interazioni, il nesso tra emergenza climatica e condizione umana (da una popolazione ai singoli individui) è studiato nella prospettiva c.d. del "*causal pathway framework*" (Ebrary.net, *Theory-based approaches: causal pathways-theory of change*; Anselmi, Binyaruka, Borghi, *Understanding causal pathways within health systems policy evaluation through mediation analysis*, in *12 Implementation Science*, 10, 2017) e ricorrendo ai c.d. "*causal loop diagrams*" (CLDs), approccio osservazionale in grado di evidenziare tutti gli intrecci che si attivano tra sistema climatico e i vari determinanti della salute umana (Pongsiri, Bassi, *A systems understanding underpins actions at the climate and health nexus*, in *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 2021, 2398; Richards, Lupton, Allwood, *Re-framing the threat of global warming: an empirical causal loop diagram of climate change, food insecurity and societal collapse*, in *Climatic Change*, 164, 2021, 1-19;; Petticrew, Knai, Thomas et al., *Implications of a complexity perspective for systematic reviews and guideline development in health decision making*, in *BMJ Glob Health*, 4, 20194, e000899).

Nella letteratura scientifica, sono poi approfonditi specifici protocolli di analisi di singoli segmenti causali dei *causal loop* dentro il sistema climatico e tra sistema climatico e individuo umano (Grasso, Manera, Chiabai, *The Health Effects of Climate Change: A Survey of Recent Quantitative Research*, in *International Journal of Environmental Research and Human Health*, 5, 2012, 1523-1547; Zhang, Lee, Wang, Li et al., *The causality analysis of climate change and large-scale human crisis*, in *108 PNAS*, 2011, 17296-17301; Hannart, Naveau, *Probabilities of causation of climate changes*, in *Journal of Climate*, 31, 2018, 5507-5524).

Sul fronte specifico della considerazione dei rischi per la salute umana, associati ai cambiamenti climatici all'interno di uno Stato, si possono evidenziare quattro linee di indagine tra loro complementari.

Il c.d. fattore DALY

In tale prospettiva, i fattori di danno alla salute associati alle emissioni di CO₂ si basano su dati dell'OMS (WHO, *Disability-adjusted life years (DALYs) attributable to the environment*), utilizzando appunto il fattore DALY (*Disability-adjusted life year* ovvero attesa di vita corretta per disabilità). Si tratta di una misura sociale della gravità globale di un qualsiasi problema alla salute (*Disability*), espressa come numero di anni persi, a causa della “disabilità” o della morte prematura interna a una determinata popolazione. Con riguardo al cambiamento climatico, i fattori di danno sono calcolati in questo modo: incremento della temperatura (°C/kg) moltiplicato per incremento di rischi (RR) per °C, tasso di mortalità di base senza cambiamento climatico (-), popolazione e anno di vita aggiustato per disabilità (DALY) per caso di morte. Rischi e tassi di mortalità di base sono stati calcolati per ogni scenario di percorsi socioeconomici condivisi (SSP) utilizzati dall'IPCC (*Database SSP*).

Questo approccio ha consentito di colmare le lacune di conoscenza sull'impatto dei cambiamenti climatici sull'attesa corretta per la disabilità presente all'interno di una popolazione e sul costo del benessere e ha il merito di rendere evidente come l'aumento della temperatura e l'aumento dei rischi relativi associati al cambiamento climatico (dove il rischio relativo – RR – identifica il rapporto tra la probabilità che si verifichi un evento in un gruppo esposto a un fattore di rischio e la probabilità che si verifichi lo stesso evento in un gruppo di non esposti al medesimo fattore), determinino direttamente un aumento del fattore di danno alla salute umana in qualsiasi sua manifestazione rispetto a una determinata “disabilità” (Tang, Furushima, Honda, *et al.*, *Estimating human health damage factors related to CO₂ emissions by considering updated climate-related relative risks*, in *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 2019, 1118–1128; Sulser, Beach, Wiebe, Dunston *et al.*, *Disability-adjusted life years due to chronic and hidden hunger under food system evolution with climate change and adaptation to 2050*, in 114 *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2, 2021, 550-563).

Il c.d. gap tra indicatori LE e HALE

L'aspettativa di vita (LE) e l'aspettativa di vita in buona salute (HALE) (WHO, *Healthy life expectancy (HALE) at birth*) sono indicatori che misurano il livello di salute nazionale. Il *gap* indica la differenza tra loro.

Conoscendo i dati di ciascuno paese sugli indicatori LE e HALE e il loro andamento nel tempo, è possibile appunto individuare il *gap* tra i due nel corso del tempo (Cao, Hou, Zang, Xu *et al.*, *A comparative, correlate analysis and projection of global and regional life expectancy, healthy life expectancy, and their GAP: 1995-2025*, in 10 *Journal of Global Health*, 2, 2020, 020407) e confrontarlo con la presenza di rischi che incidono su ciascuno indicatore.

Test di causalità di Granger e correlazioni statistiche tra cambiamento climatico, suoi impatti e salute umana

Infatti, utilizzando sempre i dati sull'aspettativa di vita (LE) e l'aspettativa di vita in buona salute (HALE) di un paese, è stato possibile dimostrare l'esistenza sia di una causalità unidirezionale tra emissioni di carbonio e aspettativa di vita, in ragione della quale, in altre parole, l'aumento di emissioni di carbonio risulta incrementare sempre la riduzione delle aspettative di vita, sia di legami causali bidirezionali tra aspettativa di vita e acqua potabile e aspettativa di vita e servizi igienici, ossia beni vitali su cui impattano i cambiamenti climatici (Rahman, Rana, Khanam, *Determinants of life expectancy in most polluted countries: Exploring the effect of environmental degradation*, in 17 *PLoS ONE*, 1, 2022, e0262802).

Nella medesima prospettiva si collocano gli studi sulle correlazioni statistiche, per esempio tra aumento della temperatura di +1°C e aumento della mortalità cardiovascolare, respiratoria e cerebrovascolare (Bunker, Wildenhain, Vandernbergh, Henschke *et al.*, *Effects of Air Temperature on Climate-Sensitive Mortality and Morbidity Outcomes in the Elderly: a Systematic Review and Meta-analysis of Epidemiological Evidence*, in *EBioMedicine*, 6, 2016, 258-268) o della mortalità in generale (McMichael, Woodruff, Hales, *Climate change and human health: present and future risks*, in *The Lancet*, 367, 2006, 859-869) e tra ondate di calore e aumento dei ricoveri ospedalieri (Bai, Li, Wang, Lavigne *et al.*, *Increased coronary heart disease and stroke hospitalisations from ambient temperatures in Ontario*, in *Hearth*, 104, 2018, 673-379), con effetti stimati dipendenti dall'esposizione e dal valore di riferimento scelti (per es. sopra il 90° percentile) (*CCM Caldo e EPIAIR*, 2009).

Il c.d. Global Burden of Disease (GBD)

Si tratta di un programma di ricerca globale promosso dalla Banca Mondiale e ripreso dall'OMS, che ha consentito di quantificare il carico sulla salute di oltre 100 malattie e lesioni per otto regioni del mondo, fornendo stime di morbilità e mortalità per età, sesso, regione e misurarne l'impatto in termini finanziari e secondo altri indicatori (Prüss-Üstün, Mathers, Corvalán, *Woodward, Introduction and methods: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels*, Geneva (WHO), 2003). Ha favorito l'elaborazione del fattore DALY. All'interno di questo approccio, il cambiamento climatico è trattato con gli stessi criteri di valutazione epidemiologica di altri rischi per la salute, in modo da evidenziare il carico delle malattie sensibili al clima e osservare come anche piccoli cambiamenti in malattie con carico alto, per fattori non climatici, causino effetti peggiori (Campbell-Lendrum, Woodruff, *Comparative risk assessment of the burden of disease from climate change*, in *114 Environmental Health Perspective*, 12, 2006, 1935-1941).

Questo ha consentito, da un lato, di constatare che l'effetto della temperatura a breve termine è uno dei percorsi più diretti che collegano il cambiamento climatico con la salute, impatto verificabile su una scala temporale da giorni a settimane, dall'altro di differenziare gli effetti diretti da quelli indiretti, che si verificano attraverso percorsi intermedi, come cambiamenti nella trasmissione di malattie infettive e trasmesse da vettori o sistemi ecologici, economici e sociali compromessi dal cambiamento climatico (Burkart, *Climate Change and the Global Burden of Disease*, in *Environmental Epidemiology*, 3, 2019, 45-46).

Ormai il caldo estremo è causa acclarata di morte e di malattie legate alle alte temperature (*The Lancet: Extreme heat is a clear and growing health issue, with evidence-based adaptation plans urgently needed to prevent unnecessary deaths*, 2021).

Predictive framework, evidence-based medicine, climate change epidemiology

Sul fronte epidemiologico, si registra un parallelismo tra il lavoro dell'IPCC e i diversi protocolli ispirati al *predictive framework* e all'*evidence-based medicine*.

In primo luogo, l'epidemiologia ha sviluppato quadri predittivi, integrati con le conoscenze dell'ecofisiologia e dell'ecologia di comunità e con approcci di modellizzazione (Altizer, Ostfeld, Johnson, Kutz *et al.*, *Climate change and infectious diseases: from evidence to a predictive framework*, in *341 Science*, 6145, 2013, 514-519).

La causalità epidemiologica, in secondo luogo, è una causalità complessa e operante non per sovrapposizione, al pari delle causalità del sistema climatico (Kundi, *Causality and the interpretation of epidemiologic evidence*, in *Environmental Health Perspectives*, 114, 2006, 969-974).

Questo spiega perché il metodo dell'IPCC di associare ai giudizi sui cambiamenti del clima e sulle loro conseguenze una valutazione di credibilità, è simile alla gradazione delle prove utilizzata nelle monografie della IARC sui rischi di cancerogenicità e alle linee guida cliniche ispirate all'*evidence-based medicine*.

Il tutto ha favorito uno scambio di informazioni e dati tra i due campi di ricostruzione delle causalità (Michelozzi, De Sario, *Crisi climatica: la popolazione italiana è una delle più vulnerabili agli effetti dell'aumento di temperatura previsto per il 2100, occorre reagire*, in 43 *Epidemiologia e Prevenzione*, 5-6, 2019, 380-381; Vineis, *Causalità, didattica e cambiamento climatico*, in 36 *Epidemiologia e Prevenzione*, 1, 2012, 61).

Si parla anche di *climate change epidemiology* (UC San Diego, *Climate Change Epidemiology*; Cox, *Toward practical causal epidemiology*, in *Global Epidemiology*, 3, 2021, 100065; Brooke Anderson, Barnes, Bell, Dominici, *The Future of climate epidemiology: opportunities for advancing health research in the context of climate change*, in 118 *American Journal of Epidemiology*, 5, 2019, 866-872).

LA CONFIDENZA SULL'ESISTENZA DEI NESSI CAUSALI

Il livello di certezza scientifica in ordine all'incidenza dei processi del cambiamento climatico sulla salute umana (espresso in termini di livelli di confidenza/attendibilità delle ricerche e rilevazioni di dati, calcoli ecc...) registra costanti implementazioni di conferma.

Queste conferme sono fondamentalmente di tre tipi:

- l'acquisizione di dati di osservazione ed elaborazione di modelli previsionali è sempre più abbondante e precisa;
- le elaborazioni dei modelli previsionali trovano sempre più larga conferma empirica negli eventi che si verificano;
- è condivisa, nella comunità scientifica, la consapevolezza che le stime elaborate su probabilità e calcoli statistici siano comunque sottodimensionate e quindi non fotografano una realtà meno problematica di quanto effettivamente sia.

Il riscontro emerge dai diversi documenti dell'IPCC, in merito al livello appunto di confidenza scientifica sulle rilevazioni e attribuzioni effettuate ed elaborate dalla ricerca scientifica in tema di nessi tra cambiamento climatico e impatti sulla salute umana.

In linea generale, la confidenza, tra molto alta, alta o media, emerge sui nessi tra cambiamento climatico e

- malattie e morti premature per incapacità di adattamento,
- distribuzione stagionale di pollini allergenici e altri vettori di allergie,
- aumento dei decessi legati a manifestazioni estreme come ondate di calore o di freddo,
- aumento della malnutrizione e dei disturbi della crescita per i più giovani,
- aumento di morti, patologie e lesioni da inondazioni, tempeste, incendi, siccità,
- problemi nella gravidanza e nel parto,
- aumento esposizione a vettori di malattie infettive e diarroiche, per modifiche dell'areale geografico e altitudinale di alcune specie vettori,
- aumento della morbilità e mortalità cardio-respiratoria,
- aumento dell'eco-ansia e perdita di sicurezza nell'accesso all'acqua, agli alimenti ecc.

L'AR5 dell'IPCC ha raffigurato articolazioni di questo panorama di catene causali, con il seguente schema.

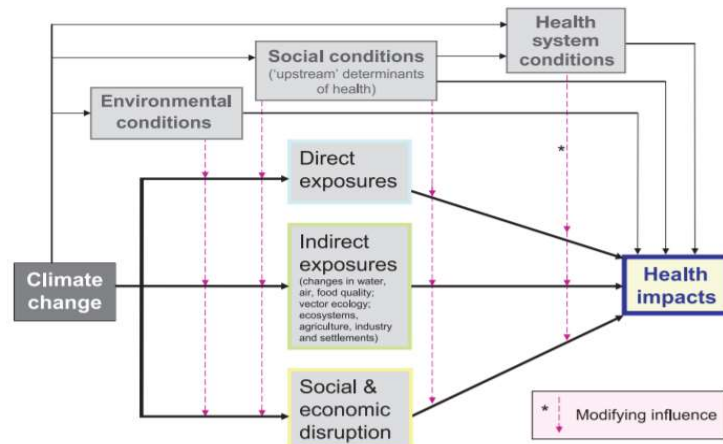
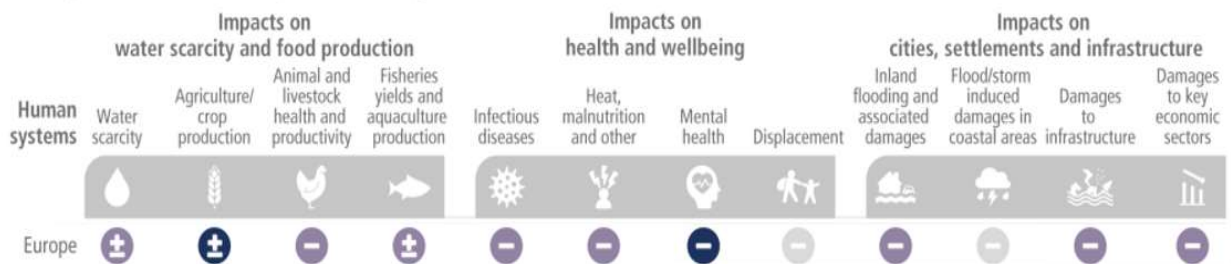


Figure 8.1. Schematic diagram of pathways by which climate change affects health, and concurrent direct-acting and modifying (conditioning) influences of environmental, social and health-system factors.

La sintesi più recente è ora rappresentata dallo schema contenuto nell'AR6 Wg2 dell'IPCC (*Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*), pubblicato nel febbraio 2022, per la parte riferita all'Europa.

Confidence in attribution to climate change	Impacts to human systems in panel (b)
● High or very high	— Increasing adverse impacts
● Medium	± Increasing adverse and positive impacts
● Low	
○ Evidence limited, insufficient	
na Not applicable	

(b) Observed impacts of climate change on human systems



Dallo schema riportato si comprende che il cambiamento climatico ha già avuto diversi impatti negativi sui sistemi umani, inclusi la sicurezza dell'acqua, la produzione alimentare, la salute e il benessere individuali, la qualità della vita in città, insediamenti e infrastrutture.

Si comprende altresì che la confidenza è quasi ovunque molto alta, alta o media. I simboli + e - indicano la direzione degli impatti osservati, con un - che denota un crescente impatto negativo e un ± che denota come possa verificarsi, all'interno di una regione, l'insorgenza di impatti negativi solo in alcuni contesti e non in altri.

LA SCIENZA DELL'ATTRIBUZIONE E DELLA PERDITA E DANNO

Altrettanto in aumento risulta la confidenza scientifica sull'attribuzione antropogenica di specifici singole manifestazioni dell'emergenza climatica. In merito, esistono diverse banche dati mondiali di ricognizione di queste evidenze, tra cui quella della Columbia University. Essa, alla fine del 2021, ha pubblicato una rappresentazione aggiornata delle attribuzioni. All'11 febbraio 2021, il database

contiene 452 risorse scientifiche che esplorano i legami tra attività umana, cambiamento climatico e impatti. Queste risorse sono elencate in quattro categorie tendenzialmente sovrapposte sull'attribuzione antropogenica del fenomeno climatico, di specifici eventi estremi, degli impatti in generale, della individuazione della fonte dell'evento dannoso. Gli studi analizzano gli impatti climatici di tutto il mondo a ogni scala, dagli impatti atmosferici mondiali a quelli che colpiscono una particolare città o ecosistema ecc.

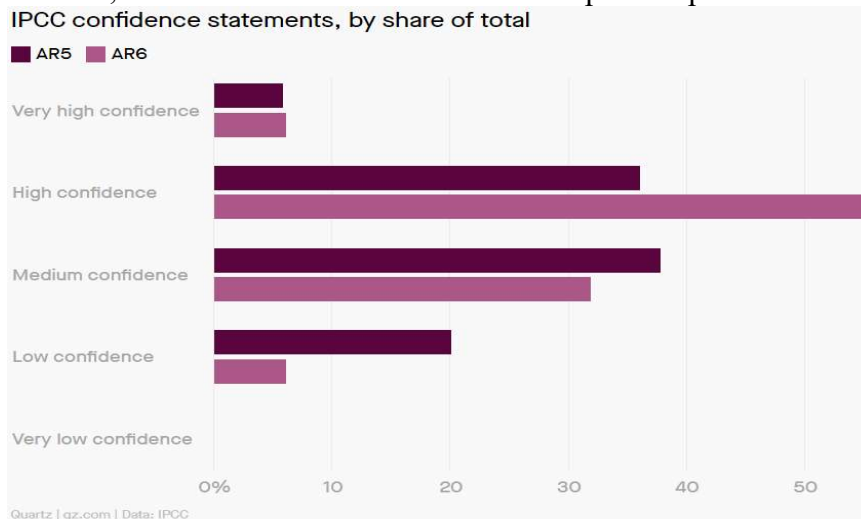
Riscontri sull'attribuzione antropogenica provengono anche da studi controfattuali (Differbaugh, Davenport, *On the impossibility of extreme event thresholds in the absence of global warming*, in *Environmental Research Letters*, 16, 2021, 115014).

Anche il seguente schema rende immediatamente visibile lo stato delle certezze, con riguardo all'attribuzione antropogenica delle manifestazioni estreme del cambiamento climatico (Michelozzi, *Clima e salute*, Roma 2016).



La dimensione del cerchio è proporzionale alla forza delle evidenze attribuibili ai cambiamenti climatici in atto (osservazioni dal 1950 ad oggi)

D'altra parte, la matrice antropogenica dell'instabilità dell'intero sistema climatico è stata definitivamente accertata dall'AR6 del 2021 dell'IPCC *The Physical Science Basis*, che riporta livelli di confidenza molto alta, alta e media in numero crescente rispetto al passato.



Nella medesima prospettiva complessa si sta evolvendo altresì la c.d. “*science of loss and damage*”, ovvero la scienza che studia l'attribuzione delle manifestazioni e degli impatti dell'emergenza climatica all'aumento delle concentrazioni di gas serra (Boyd, Chaffin, Dorkenoo, Jackson *et al.*, *Loss and damage from climate change: A new climate justice agenda*, in *10 One Earth*, 2021, 1365-1370).

In merito, prove crescenti suggeriscono che gli impatti dei cambiamenti climatici sono già stati osservati e analizzati in tutto il mondo, coprendo una superficie pari all'80% del pianeta e interessando una popolazione pari all'85% degli abitanti del pianeta, con probabilità alte di sottostima



di rilevazione dei fenomeni (Callaghan, Schleussner, Nath, Lejeune *et al.*, *Machine-learning-based evidence and attribution mapping of 100,000 climate impact studies*, in *Nature Climate Change*, 11, 2021, 966-972).

Anche le funzioni quantitative dei danni variano in base al campo di osservazione dei nessi causali, da una dimensione macro, dove si ricorre a modelli di valutazione integrata (IAM) (Zhao, Chen, Liu, Yang *et al.*, *Global climate damage in 2 °C and 1.5 °C scenarios based on BCC_SESM model in IAM framework*, in *Advances in Climate Change Research*, 3, 2020, 261-272), sino al livello delle singole perdite di condizioni salubri, a seguito di eventi determinati dal cambiamento climatico, per le quali si può ricorrere a formule individualizzate di quantificazione, come l'indice di Balthazard, la Formula Magnus, la Formula Groenouw e quella di Gabrielli.