

Scarica PDF

[natura](#) > [comunicazioni sulla natura](#) > [articoli](#) > articolo

Scarica PDF

Articolo | [Accesso aperto](#) | Pubblicato: 27 gennaio 2020

L'accordo di Parigi sul clima supera il test costi-benefici

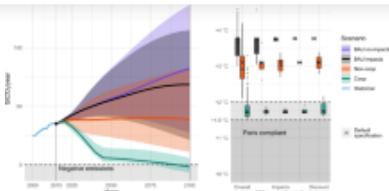
[Nicole Glanemann](#), [Sven N. Willner](#)  e [Anders Levermann](#)

[Comunicazioni sulla natura](#) **11**, Numero articolo: 110 (2020)

40k Accessi | **103** citazioni | **451** Altmetrico | [Metrica](#)

Astratto

L'accordo di Parigi sul clima mira a mantenere l'aumento della temperatura ben al di sotto dei 2 °C. Ciò implica costi di mitigazione e danni climatici evitati. Qui mostriamo che, indipendentemente dalle ipotesi normative di avversione alla disuguaglianza e preferenze temporali, l'accordo costituisce il percorso politico economicamente ottimale per il secolo. A tal fine incorporiamo costantemente una curva costo-danno che riproduce la relazione osservata tra temperatura e crescita economica nel modello di valutazione integrato DICE. Forniamo quindi un'analisi costi-benefici ottimizzante intertemporale del problema climatico di questo secolo. Teniamo conto delle incertezze relative alla curva del danno, alla sensibilità climatica, al futuro socioeconomico e ai costi di mitigazione. La temperatura ottimale risultante è solida come si può comprendere dalla dipendenza generica dalla temperatura dei costi di mitigazione e dal livello di danni dedotto dalla relazione temperatura-crescita osservata. I nostri risultati mostrano che l'accordo di Parigi sul clima motivato politicamente rappresenta anche il percorso economicamente favorevole, se eseguito correttamente.



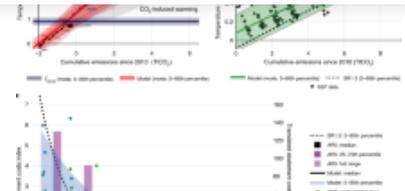
Persistente disuguaglianza nelle politiche climatiche economicamente ottimali

Articolo | Accesso libero
08 giugno 2021



Sull'ottimalità degli obiettivi di 2°C e una decomposizione dell'incertezza

Articolo | Accesso libero
06 maggio 2021



I costi del raggiungimento degli obiettivi climatici e le fonti di incertezza

Articolo | 23 marzo 2020

Introduzione

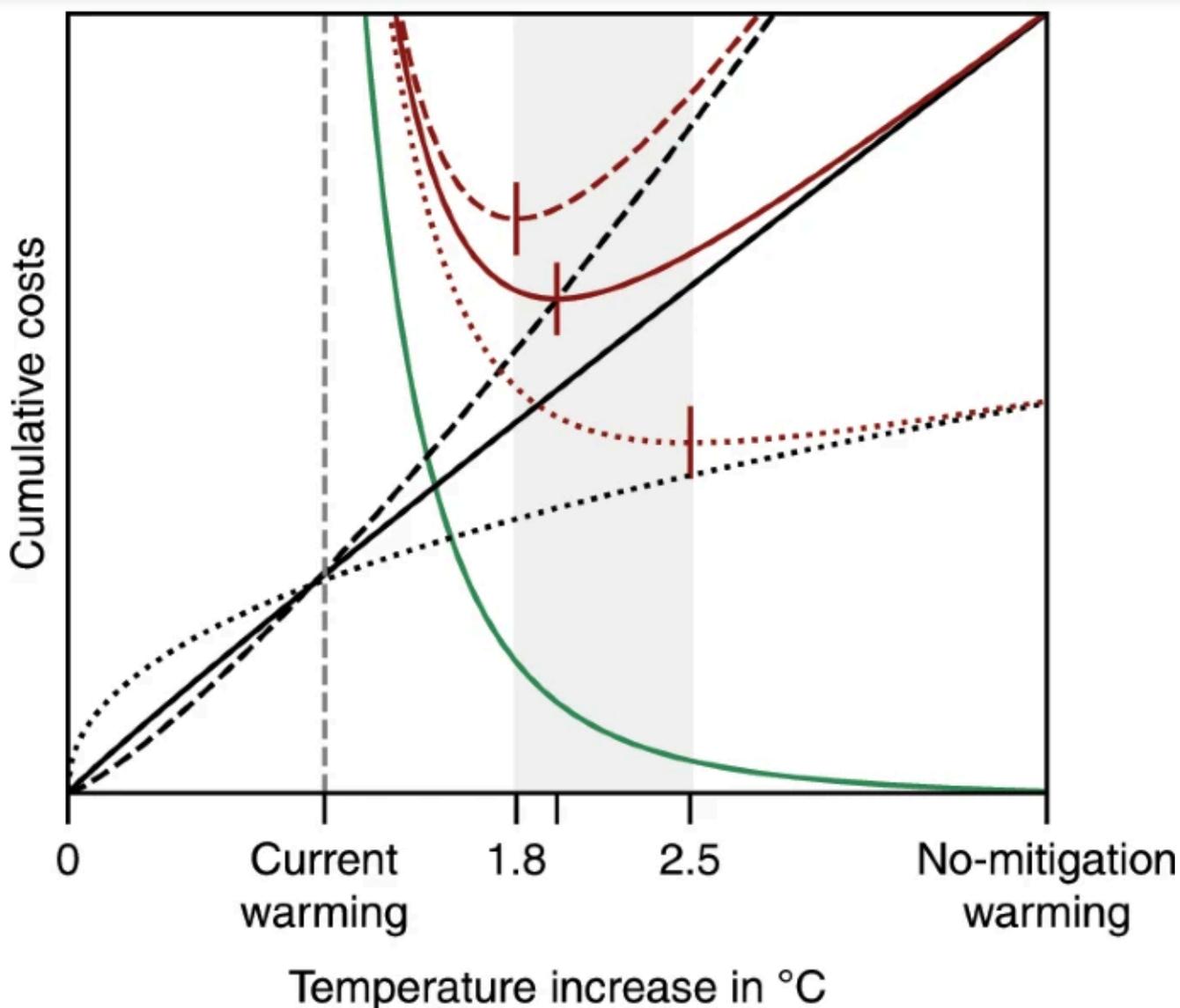
Gli obiettivi di temperatura concordati nell'accordo di Parigi sul clima¹ derivano da un lungo e complesso processo politico². Tuttavia, non è chiaro se gli sforzi di riduzione delle emissioni associati siano economicamente favorevoli^{2,3}. Sebbene le analisi econometriche^{4,5,6,7,8} suggeriscano grandi danni a temperature più elevate, queste non sono ancora state utilizzate per ricavare i relativi benefici economici del raggiungimento di questi obiettivi di temperatura^{2,3}. In particolare, le stime^{6,8} delle perdite osservate indotte dalla temperatura nel prodotto interno lordo non sono state prese in considerazione nei calcoli dei percorsi politici economicamente ottimali. Qui forniamo una valutazione macroeconomica di questi obiettivi tenendo conto delle recenti stime degli impatti sulla crescita economica indotti dal riscaldamento, che sono fornite da Burke et al.^{6,8} (BHM, di seguito). BHM ha avanzato le conoscenze precedenti⁴ sulla relazione tra temperatura e crescita economica trovando una relazione non lineare universale. È stato dimostrato che il riscaldamento provoca uno spostamento lungo la curva di crescita e riduce la crescita oltre una certa soglia di temperatura.

Finora, le stime BHM hanno dimostrato di corrispondere a un costo sociale del carbonio piuttosto elevato⁹, indicando che la riduzione delle emissioni dovrebbe

Sebbene tali stime non siano esenti da criticità —, è un naturale e necessario passo scientifico successivo confrontarle con i costi di mitigazione del cambiamento climatico (costi di mitigazione, di seguito) utilizzando un modello di valutazione integrato (IAM). Gli IAM tengono conto delle diverse interazioni dinamiche tra l'economia e il clima [12](#), [13](#).

Questo confronto fornisce il riscaldamento di fine secolo associato ai costi totali più bassi di danni e mitigazione come impiegato nell'IAM utilizzato (Fig. [1](#)). Il riscaldamento ottimale costo-beneficio è quindi determinato dalla forma delle due curve di costo. Le curve di mitigazione-costi sono caratterizzate da due proprietà universali. In primo luogo, divergono al riscaldamento attuale, in particolare se non sono disponibili tecnologie a emissioni negative. In secondo luogo, i costi di mitigazione diminuiscono a zero per uno scenario di riscaldamento senza alcuno sforzo di mitigazione. La curva danno-costi, d'altra parte, è nota per essere zero senza riscaldamento e per aumentare con l'aumento delle temperature. Il livello a cui i danni aumentano senza mitigazione è soggetto a indagine. Tuttavia, a causa della divergenza dei costi di mitigazione, la temperatura economicamente ottimale diventa meno sensibile al livello esatto dei danni una volta che questi hanno raggiunto un certo livello (Fig. [1](#)). Qui, esaminiamo se i danni che derivano dall'estrapolazione della relazione osservata tra crescita economica e temperatura [6](#), [8](#) siano oltre questo livello.

Fig. 1: Illustrazione dell'universalità dell'analisi climatica costi-benefici.



I costi cumulativi di mitigazione (curva verde) e i danni climatici (curva nera) in funzione del livello di riscaldamento della Terra danno i costi climatici totali (curva rossa). I costi di mitigazione divergono per il riscaldamento attuale e convergono a zero per il riscaldamento non mitigato. I danni sono pari a zero per il riscaldamento zero e aumentano con la temperatura. La caratteristica pendenza della curva di mitigazione implica che oltre un certo livello di danno la temperatura economicamente ottimale (che minimizza i costi totali) diventa insensibile a un ulteriore aumento dei danni. Ad esempio, aumentare (tratteggiato nero) o diminuire (punteggiato nero) il livello di danno della metà del livello di danno iniziale non modifica significativamente il livello di riscaldamento economicamente ottimale (area grigia).

un modo scientificamente altamente trasparente e controllato. Secondo la sua versione originale, che è stata anche impiegata per consigliare la politica climatica degli Stati Uniti [17](#), [18](#), [19](#), il raggiungimento dell'obiettivo di 2 °C causerebbe costi di mitigazione significativamente maggiori dei conseguenti danni evitati [16](#), [20](#), [21](#). Questo risultato è dovuto in gran parte a una funzione di danno che non incorpora le recenti stime degli impatti economici [13](#), [22](#), [23](#). Qui, aggiorniamo questa funzione in base alle stime BHM [8](#). Poiché DICE cerca il percorso di crescita economica che massimizza il benessere globale, le stime di crescita non possono essere implementate direttamente. Come soluzione a questo problema sviluppiamo una nuova procedura che preserva la caratteristica del modello di crescita. In questo, regoliamo iterativamente la funzione di danno per riprodurre la relazione di crescita indotta dalla temperatura stimata in DICE-2013. Per coerenza con le stime BHM, progettiamo uno scenario che emula un mondo futuro in cui le condizioni chiave sono simili a quelle del passato, ovvero l'assenza di una politica climatica.

Utilizziamo questa funzione di danno aggiornata per ricavare la politica climatica ottimale costi-benefici che inizia con l'anno 2020. In questo scenario economicamente ottimale, la mitigazione è attivamente perseguita per massimizzare il benessere globale. Continuiamo a sostenere l'ipotesi di DICE-2013 secondo cui in questo secolo non sono disponibili tecnologie significative a emissioni negative. Confrontiamo la politica ottimale con lo scenario business-as-usual (BAU), in cui la politica climatica è assente. Scopriamo che in queste condizioni l'obiettivo di 2 °C come stabilito dall'accordo di Parigi sul clima fornisce il percorso ottimale costi-benefici fino alla fine di questo secolo. Osserviamo che questa scoperta è ampiamente robusta a diverse incertezze. I nostri risultati sostengono quindi un'implementazione rapida e decisa dell'accordo di Parigi sul clima.

Risultati

Temperatura ottimale rapporto costo-beneficio

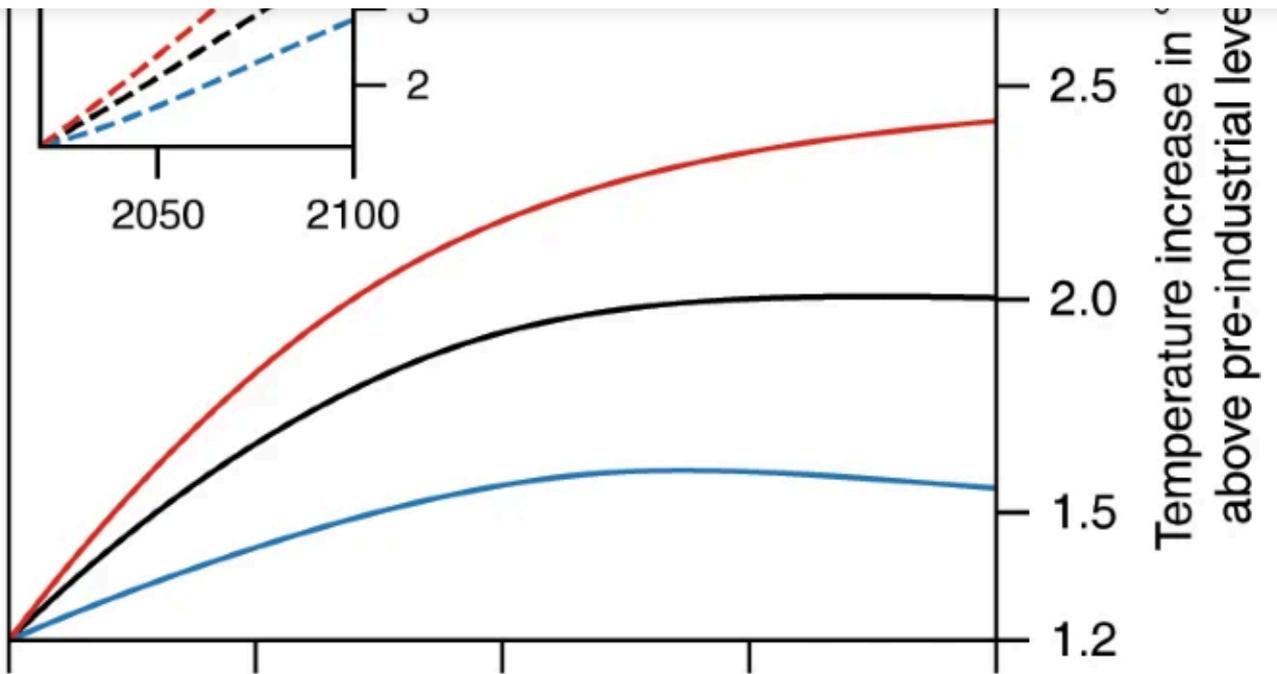
Nelle nostre analisi, teniamo conto dell'incertezza nello sviluppo futuro della temperatura considerando tre valori alternativi di sensibilità climatica all'equilibrio

specimens del modello. Per questo adottiamo l'approccio bootstrapping dello studio empirico originale⁸ e utilizziamo i 1000 campioni risultanti per derivare un insieme corrispondente di funzioni di danno. Conduciamo anche analisi di sensibilità riguardanti le preferenze sociali per i cambiamenti di consumo²⁴, i futuri socioeconomici alternativi²⁵ e i costi di mitigazione.

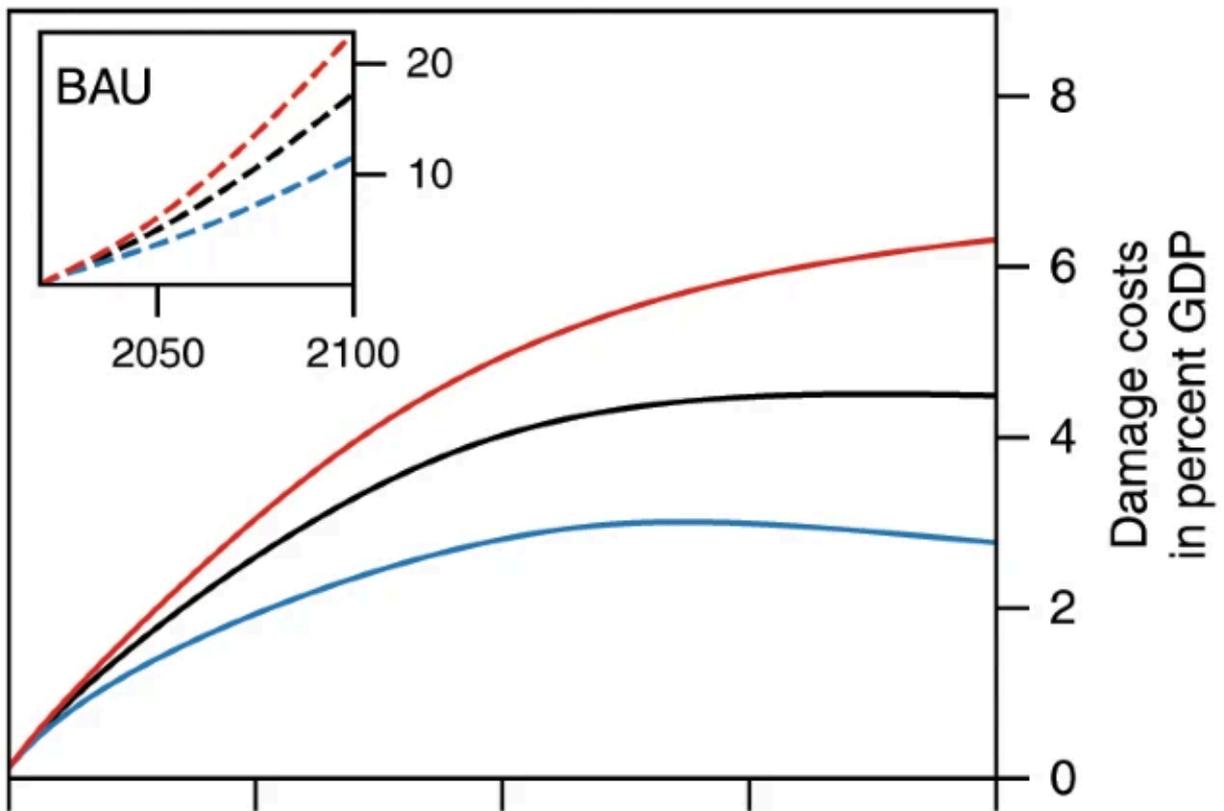
Abbiamo scoperto che l'obiettivo di 2 °C rappresenta la temperatura ottimale costo-beneficio per la calibrazione di base (Fig. 2a). Questa calibrazione coinvolge la migliore stima⁸ della relazione temperatura-crescita economica nel passato e il valore ECS originale in DICE-2013 di 2,9 °C, che è al centro delle stime per diversi decenni^{26, 27}. Valori ECS più elevati spostano il livello di riscaldamento obiettivo per cui la curva dei costi di mitigazione diverge all'infinito verso valori più elevati (Fig. 1), ovvero comportano costi di mitigazione sostanzialmente più elevati. Per ECS di 4 °C, ad esempio, l'obiettivo di 2 °C diventa troppo costoso. Tuttavia, con un riscaldamento obiettivo ottimale di 2,4 °C la deviazione da questo obiettivo non è ampia. Per valori ECS più piccoli, ad esempio di 2 °C, limitare ulteriormente il riscaldamento ben al di sotto di 2 °C è economicamente ottimale.

Indipendentemente dall'ECS esatto, gli sforzi di mitigazione ottimali promettono una significativa riduzione dei danni rispetto allo scenario BAU (~14% per ECS di 4 °C, ~10% per ECS di 2,9 °C e ~8% per ECS di 2 °C). Questi sforzi sono, come affermato anche dall'Accordo di Parigi, ambiziosi (Articolo 3)¹ e comportano misure molto severe fin dall'inizio (Fig. 2c).

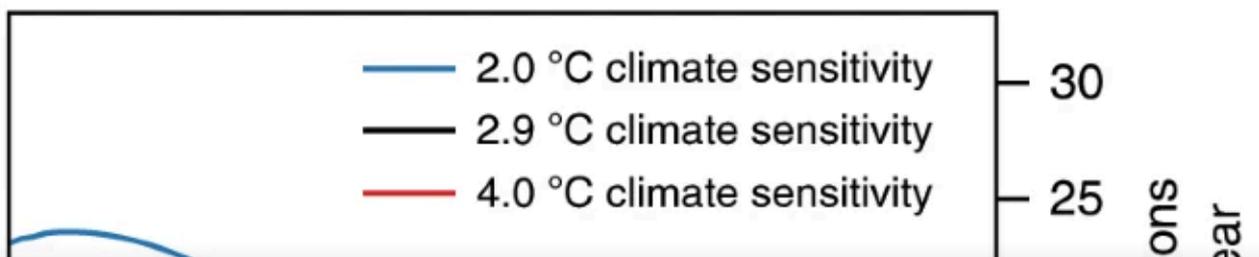
Fig. 2: Aumento della temperatura, costi dei danni ed emissioni di carbonio con una politica ottimale costi-benefici per tre diverse sensibilità climatiche.

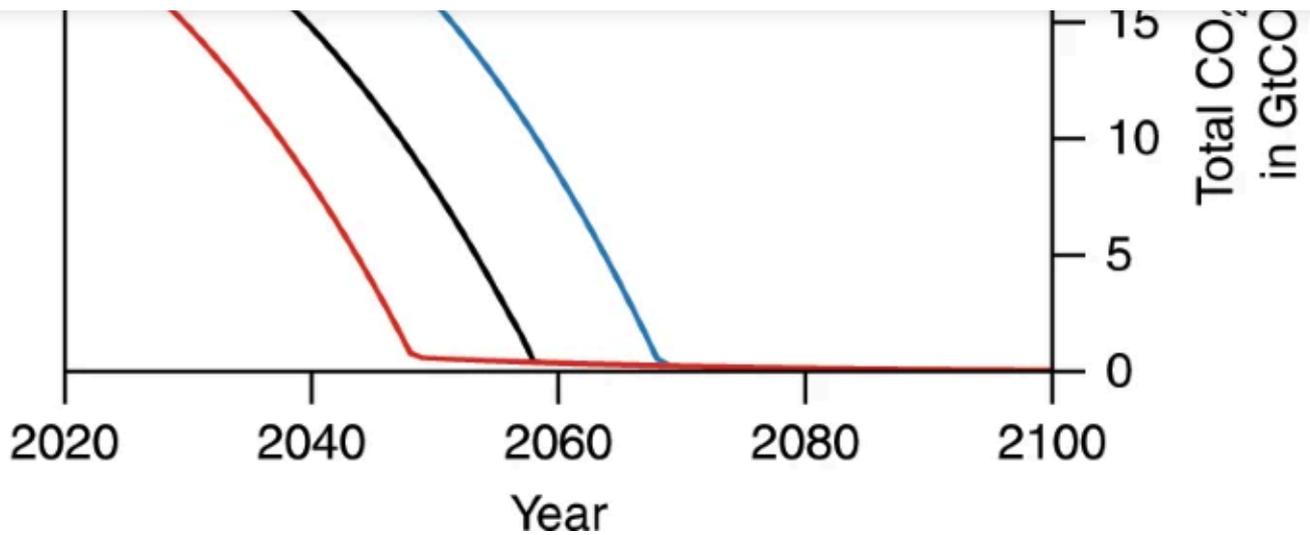


b



c



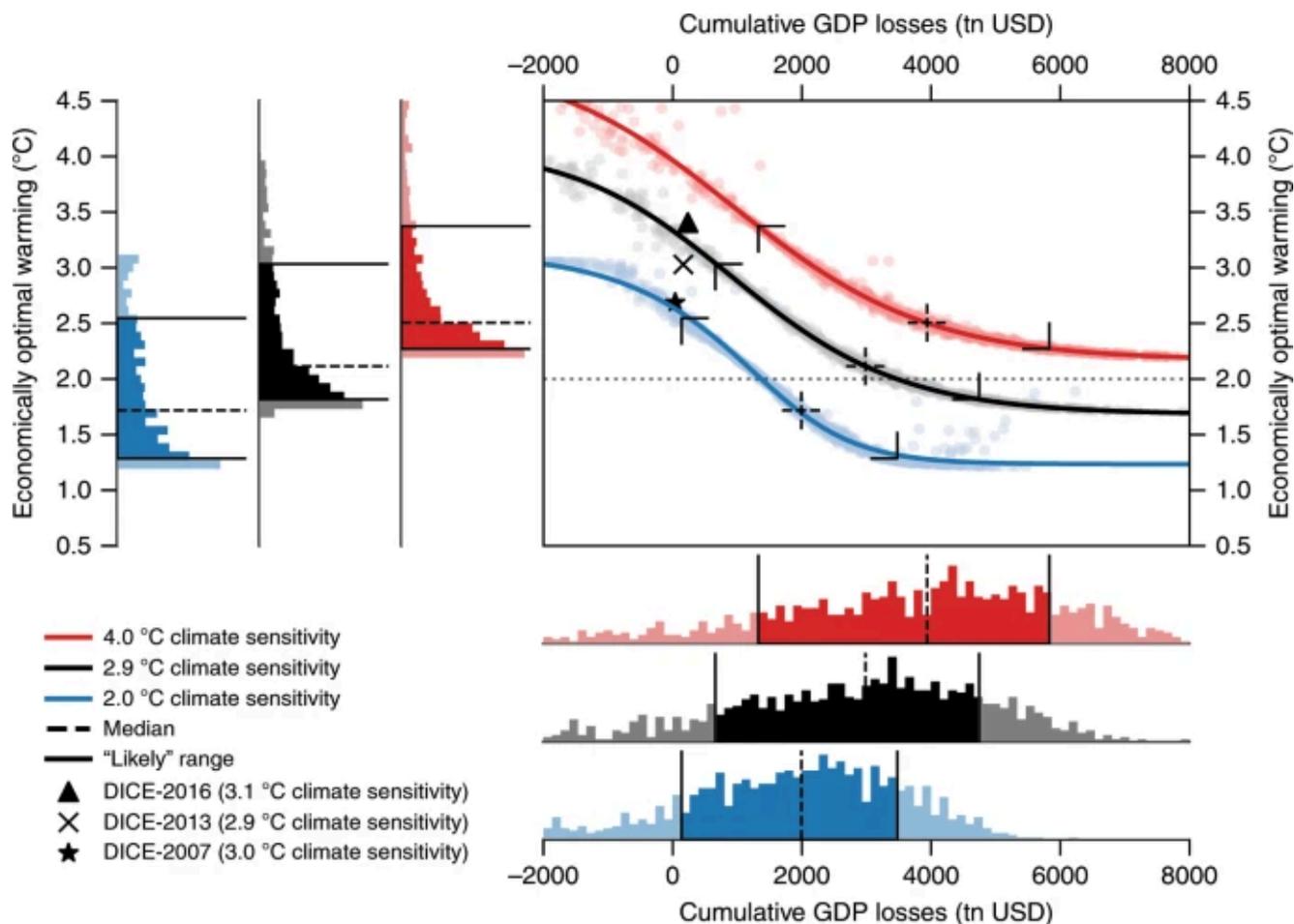


Le curve nere sono associate alla calibrazione originale della sensibilità climatica di 2,9°C; le curve blu con una sensibilità climatica di 2°C e la curva rossa con una sensibilità climatica di 4°C. Le figure inserite consentono di confrontare lo sviluppo della temperatura economicamente ottimale e i costi dei danni con i loro valori corrispondenti nello scenario BAU.

Incertezza nella funzione di danno

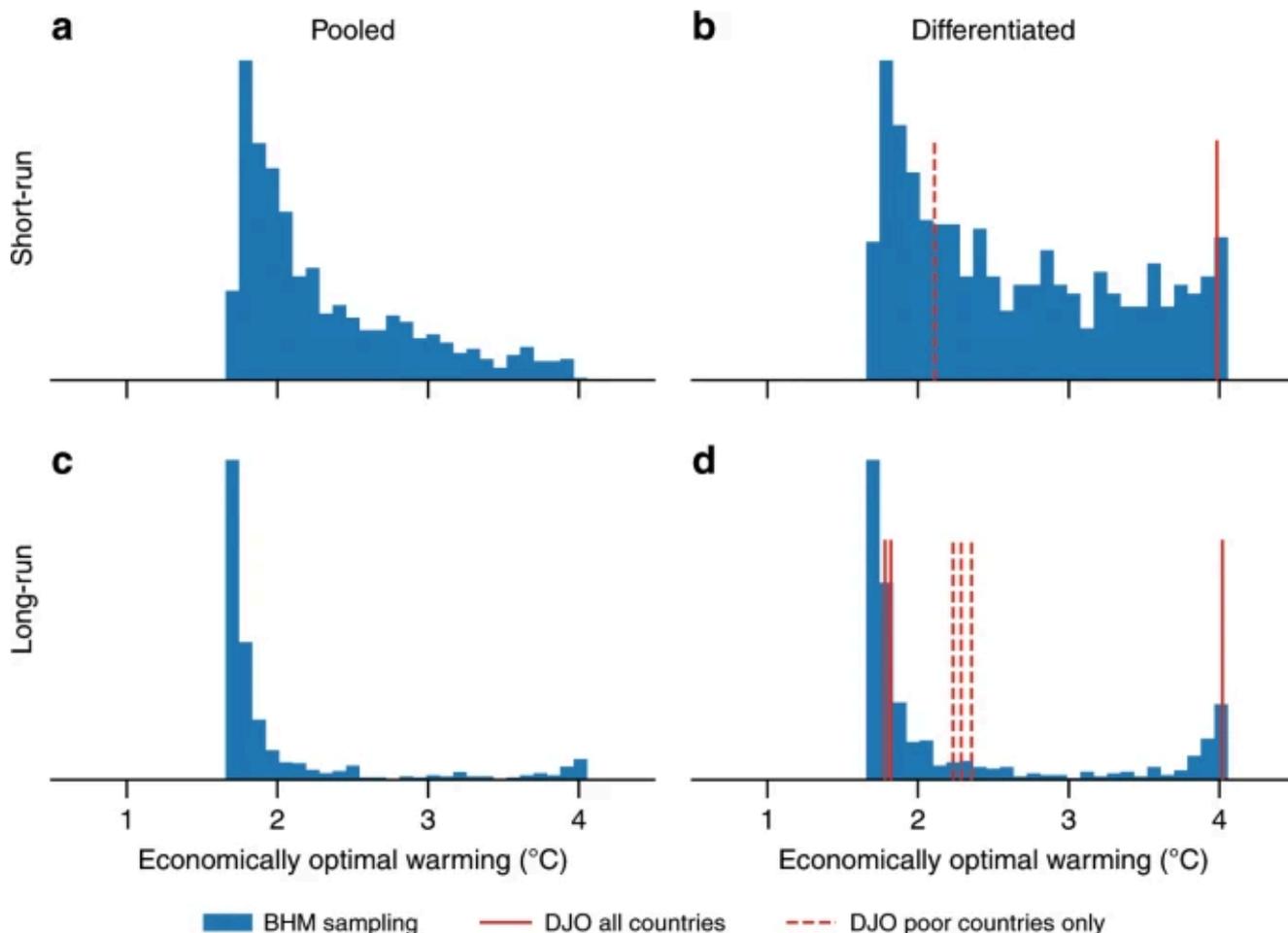
Per esaminare gli effetti dell'incertezza nelle stime di impatto, utilizziamo le perdite cumulative di PIL fino al 2100 (in \$US 2005) nello scenario BAU come misura della gravità dell'impatto e le associamo alla temperatura di fine secolo economicamente ottimale (Fig. 3). L'incertezza nei costi dei danni, secondo lo studio empirico ^{6,8}, è sostanziale rispetto all'entità e al segno dell'impatto del riscaldamento e implica anche grandi differenze nei nostri risultati. Tuttavia, la mediana dell'insieme delle temperature ottimali è solo marginalmente superiore a 2 °C per ECS di 2,9 °C e ben al di sotto di 2 °C per ECS di 2 °C. Questo risultato è robusto alle specifiche alternative dell'approccio bootstrapping ⁸ (Fig. supplementari 1 e 2) e alla maggior parte delle specifiche del modello alternativo di BHM e alle stime econometriche alternative di Dell et al. ⁴ (Fig. 4 e Fig. supplementari 3 – 6). Pertanto, l'obiettivo di limitare il riscaldamento a 2 °C o meno è ottimale in termini di costi-benefici per un ampio insieme di funzioni di danno. Al contrario, i risultati delle versioni DICE originali ^{16,21} si discostano in modo significativo dall'intervallo probabile calcolato (Fig. 3).

fino alla fine del secolo, data l'incertezza nelle stime dell'impatto storico e l'incertezza nel valore della sensibilità climatica.



I punti sparsi forniscono l'insieme di incertezza nella relazione storica tra aumento della temperatura e crescita economica per tre diverse sensibilità climatiche; punti rossi per la sensibilità climatica di 4 °C, punti neri per la calibrazione originale della sensibilità climatica nel modello DICE-2013R e punti blu per la sensibilità climatica di 2 °C. Ogni punto rappresenta l'output del modello DICE-2013 per una funzione di danno calibrata secondo uno dei 1000 bootstrap della regressione storica. Le curve nel grafico principale rappresentano la migliore corrispondenza per la relazione tra costi cumulativi del danno e riscaldamento ottimale. Gli istogrammi sotto e a sinistra forniscono la frequenza dei risultati del modello nonché le mediane e gli intervalli probabili per ciascuna delle tre sensibilità climatiche. La probabile fascia di riscaldamento ottimale di fine secolo si colloca approssimativamente tra 2,3 °C e 3,4 °C con una mediana di 2,5 °C per la sensibilità climatica di 4 °C, tra 1,8 °C e 3 °C con una mediana di 2,1 °C per una sensibilità climatica di 2,9 °C e tra 1,3 °C e 2,5 °C con una mediana di 1,7 °C per una sensibilità climatica di 2 °C. I risultati delle

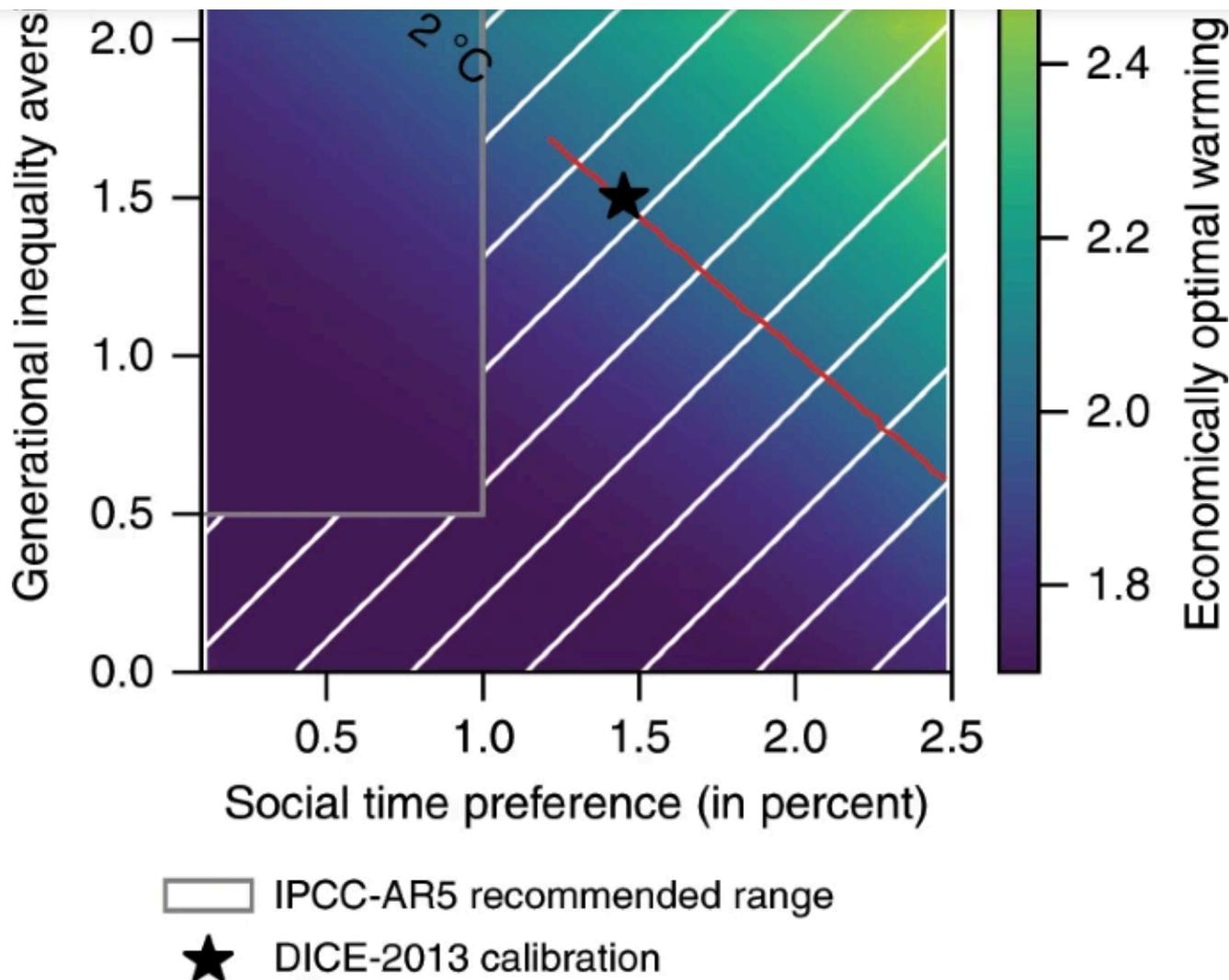
Fig. 4: Insiemi che includono l'incertezza nelle stime degli impatti storici secondo BHM (barre blu) e alcuni campioni secondo Dell et al.⁴ (DJO, linee rosse).



Specificazione delle stime senza (breve periodo (**a** , **b**)) e con (lungo periodo (**c** , **d**)) l'ipotesi che l'influenza del riscaldamento sulla crescita economica sia ritardata e/o senza (pooled (**a** , **c**)) e con (differenziate (**b** , **d**)) che differenziano tra impatti sui paesi poveri e su quelli ricchi. Ogni specificazione per BHM campiona da 1000 bootstrap della regressione storica; i campioni per DJO includono specifiche senza ritardo (**b**) e specifiche con 1 ritardo, 5 ritardi e 10 ritardi (**d**).

preferenza per il consumo in diversi momenti, con un valore più alto che da più tardi al consumo presente piuttosto che a quello futuro; e in secondo luogo, l'"elasticità dell'utilità marginale del consumo" (EMUC) che descrive le preferenze per un maggiore consumo, indipendentemente dalla sua tempistica, ed è interpretata come avversione alla disuguaglianza generazionale²¹. Poiché questi parametri influenzano in modo cruciale le decisioni di mitigazione e investimento ottimali²⁸, gli effetti di crescita impliciti sono critici per i nostri risultati. Adottando il punto di vista prescrittivo della calibrazione di IRSTP ed EMUC²⁴, teniamo conto di ampi intervalli di valori, tra cui la calibrazione di base in DICE-2013 e i suggerimenti dell'IPCC-AR5²⁹. Quest'ultimo propone valori IRSTP prossimi allo zero, che interpretiamo come valori inferiori all'1%. Ad eccezione di alcuni valori insoliti dei parametri, questa ampia gamma di opzioni porta a un riscaldamento ottimale di circa 2 °C o inferiore (Fig. 5).

Fig. 5: Sensibilità della temperatura economicamente ottimale nel 2100 a tassi iniziali alternativi di preferenza temporale sociale e di avversione alla disuguaglianza generazionale.



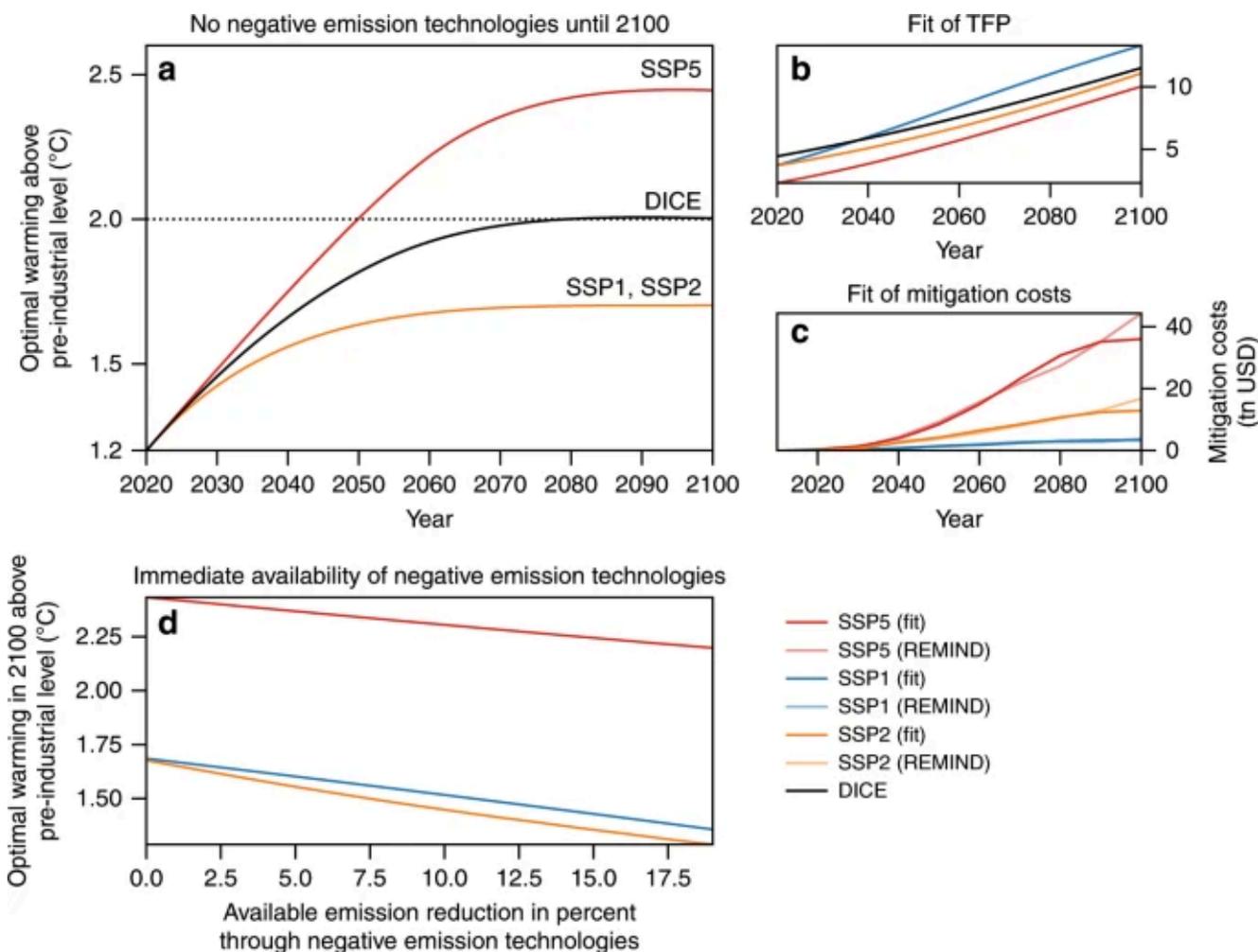
Queste simulazioni si basano sulla stima dell'impatto di riferimento come in Fig. 2 con una sensibilità climatica all'equilibrio (ECS) di 2,9 °C. La casella non tratteggiata indica l'intervallo di valori raccomandato dal rapporto IPCC-AR5 [29](#). La stella nera raffigura la calibrazione DICE-2013 [16](#). La linea rossa segna l'isoquanto di 2 °C.

Temperatura ottimale costo-beneficio negli scenari SSP

Ulteriori test mostrano anche la robustezza alle ipotesi socioeconomiche alternative come descritto dagli Shared Socioeconomic Pathways (SSP) [25](#) (Fig. 6). Poiché la funzione di costo di mitigazione in DICE è fortemente semplificata, esaminiamo come i nostri risultati cambiano con funzioni che descrivono diverse possibilità tecnologiche in futuro (Fig. 7). Similmente alle differenze tra i risultati per una gamma di funzioni di danno, l'incertezza nei costi di mitigazione si riflette sul livello

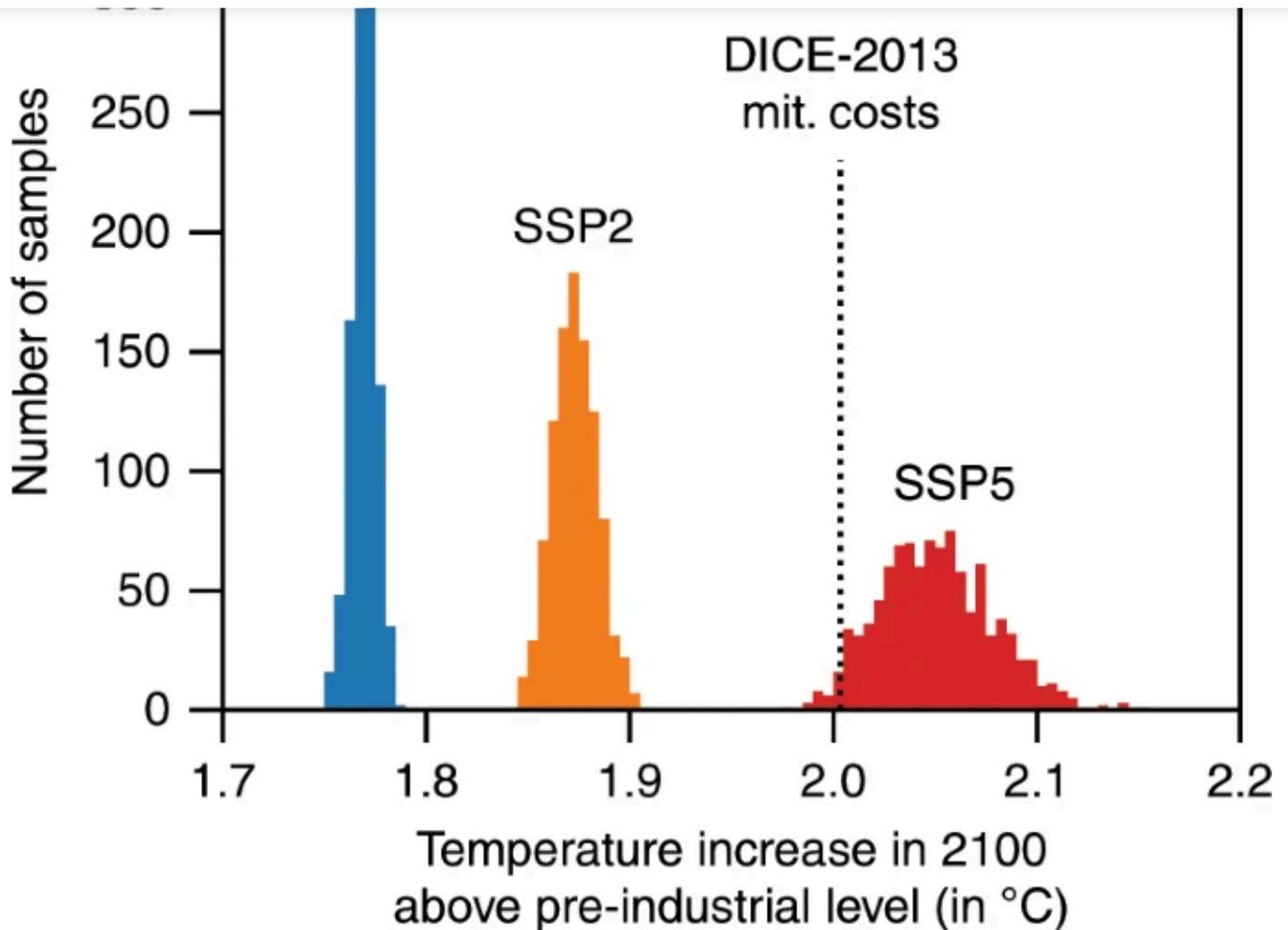
micron (1,5 °C, 1,7 °C, 2,0 °C).

Fig. 6: Riscaldamento economicamente ottimale per SSP1, SSP2, SSP5 e DICE.



a Percorso di temperatura economicamente ottimale per diverse condizioni socioeconomiche, partendo dal presupposto che le tecnologie a emissioni negative non vengano utilizzate entro questo secolo. **b**, **c** Parametri ricalibrati in DICE per adattarli ai risultati del modello REMIND per i tre SSP. **b** mostra i risultati per la produttività totale dei fattori (TFP) e **c** per i costi di mitigazione. **d** Riscaldamento economicamente ottimale nel 2100 se le tecnologie a emissioni negative saranno disponibili in questo secolo.

Fig. 7: Aumento della temperatura economicamente ottimale per funzioni alternative di costo di mitigazione.



Le funzioni di mitigazione, che sono campionate dall'adattamento SSP, riflettono diverse possibilità tecnologiche in futuro come riflesso dagli SSP. La linea tratteggiata mostra il valore per la stima di riferimento (DICE-2013).

Discussione

I nostri risultati si basano sui più recenti progressi empirici delle stime di impatto, che integriamo costantemente in un IAM dinamico. Queste stime non sono, tuttavia, prive di critiche, soprattutto per quanto riguarda la presunta relazione funzionale, l'importanza dell'utilizzo di variabili meteorologiche per approfondimenti sugli impatti climatici e altre sfide metodologiche. In particolare, il loro utilizzo nelle proiezioni presuppone che il collegamento temperatura-impatto storicamente osservato possa essere estrapolato nel futuro. Tuttavia, questa relazione può cambiare se un ulteriore riscaldamento è associato a una variazione senza precedenti negli estremi climatici, ad esempio con potenziali effetti a cascata [30](#), [31](#), [32](#), [33](#) o con il verificarsi di devastanti punti di svolta climatici [34](#), [35](#) o con cambiamenti significativi

senza variabilità. I costi economici associati alla variabilità della temperatura potrebbero, tuttavia, richiedere sforzi di mitigazione ancora più rigorosi.

Inoltre, la valutazione degli impatti in termini di PIL è una misura incompleta per i benefici complessivi della mitigazione del cambiamento climatico, poiché vengono omesse le perdite non monetarie, come la perdita di vite umane e di biodiversità. A meno che l'adattamento al cambiamento climatico non diventi efficace, la maggior parte di questi punti suggerisce una forte sottostima degli sforzi di mitigazione necessari.

Allo stesso modo, un'analisi globale come la nostra, ovviamente, trascura le questioni distributive su chi sopporta gli oneri dei danni e i costi di mitigazione. Alcune specifiche delle funzioni di danno che impieghiamo qui differenziano almeno tra due classi di livelli di reddito. Qui, dobbiamo fare ipotesi semplificative riguardo alle quote di queste classi per incorporarle nel modello a una regione, che costituisce un'altra fonte di incertezza (Fig. 4). In generale, un calcolo costi-benefici deve essere interpretato con cautela tenendo a mente considerazioni etiche. Come altri studi³⁶ utilizziamo DICE come un surrogato parsimonioso per IAM più complessi e spazialmente disaggregati. La ricerca futura dovrebbe trasferire la nostra analisi a questi IAM per chiarire le questioni dell'eterogeneità dell'impatto regionale e per tenere pienamente conto delle stime empiriche specifiche della regione.

Nella nostra analisi, il margine di manovra per raggiungere l'obiettivo dei 2 °C è considerevolmente limitato dall'esclusione di emissioni negative in questo secolo. Tuttavia, dimostriamo che, se i danni futuri seguono la stessa dipendenza dalla temperatura osservata storicamente, i costi complessivi dei danni raggiungeranno un livello che rende ottimale il rapporto costi-benefici di 2 °C. Questo risultato si evolve come conseguenza diretta delle prove empiriche recentemente fornite che attestano notevoli aumenti marginali dei danni per temperature più elevate e il comportamento funzionale universale dei costi di mitigazione in prossimità delle temperature attuali (cfr. Fig. 1).

L'IAM utilizzato per questa analisi è DICE [16](#), [20](#), che accoppia completamente un semplice modello climatico con un modello Ramsey dell'economia globale. DICE descrive l'interazione tra cambiamento climatico e decisioni economicamente ottimali di allocazione del reddito disponibile al consumo, all'investimento e agli sforzi di mitigazione. Mentre il consumo aumenta il benessere da massimizzare come obiettivo nel modello, l'investimento nel capitale di produzione assicura il reddito futuro. La produzione che genera reddito assume quindi un ruolo cruciale per il benessere delle generazioni presenti e future. Il modello dimostra anche il lato negativo dell'aumento della produzione. Se non mitigate, le emissioni di gas serra sono un sottoprodotto delle attività economiche. Questi gas si accumulano nell'atmosfera e determinano, con un certo ritardo, la temperatura globale. Gli impatti climatici causano quindi perdite economiche che riducono il reddito disponibile. Dati tutti questi compromessi, il modello cerca il percorso di allocazione che massimizza il benessere.

La versione DICE che utilizziamo è DICE2013Rv2_102213_vanilla_v24b.gms, che qui e nel testo principale abbreviamo come DICE-2013. Questa versione era la più recente quando è iniziata questa ricerca. Nel frattempo, una versione DICE più recente, ovvero DICE2016R-091916ap.gms, è stata rilasciata da William Nordhaus. Queste due versioni sono simili rispetto al loro background analitico [21](#), ma implicano temperature ottimali leggermente diverse (DICE-2016 implica una temperatura ottimale di 0,2 °C più alta che si verifica circa 30 anni dopo). DICE è stato aggiornato rispetto alla calibrazione del prodotto interno lordo (PIL) reale, ai suoi futuri tassi di crescita, alle stime della popolazione, ai dati sulle emissioni attuali, ai costi di riduzione delle emissioni, all'intensità del carbonio, al ciclo del carbonio e ai costi dei danni [21](#).

In particolare, la calibrazione del ciclo del carbonio ha subito modifiche significative. Poiché i modelli climatici all'avanguardia sono troppo costosi dal punto di vista computazionale, negli IAM vengono utilizzati modelli semplificati che spesso consistono solo di poche equazioni lineari. Tuttavia, è stato dimostrato che molti IAM

ciclo del carbonio immettono ma la risposta non inverte dell'oceano a livelli di carbonio atmosferico più elevati [39](#). Le rappresentazioni lineari che sono adattate all'assorbimento iniziale del carbonio portano a una rimozione troppo rapida della CO₂ atmosferica _{dopo} diversi decenni [39](#). Il riscaldamento nei secoli successivi e l'entità dell'intervento politico necessario sono quindi sottostimati [37](#), [38](#), [39](#). Questo problema esiste anche in DICE-2013, che mira ad adattare le dinamiche del ciclo del carbonio a breve termine (principalmente i primi cento anni) [21](#) di modelli più grandi. L'impiego del modello del ciclo del carbonio di DICE-2013 in questo studio significa quindi che, sebbene il modello rappresenti bene le dinamiche del ciclo del carbonio in questo secolo (cfr. Fig. 1 in Glotter et al. [39](#) e lo sviluppo della temperatura per i Representative Concentration Pathways nella Supplementary Fig. [7](#)), i nostri risultati riguardanti l'obiettivo di temperatura e gli sforzi politici ottimali sono stime piuttosto conservative. L'errore nelle raccomandazioni politiche può diventare particolarmente ampio per piccoli tassi di sconto, il che è importante da riconoscere rispetto al nostro test di robustezza con valori alternativi dei parametri di preferenza (Fig. [5](#)).

In DICE-2016, la linearità delle equazioni differenziali di primo ordine è mantenuta, ma i parametri sono calibrati per fornire una buona corrispondenza per il futuro più lontano (periodi fino a 4000 anni) [21](#). I costi di riduzione delle emissioni sono stati leggermente aumentati in DICE-2016. Tuttavia, questa modifica non influisce significativamente sui risultati [21](#).

Come affermato da Nordhaus [21](#), il cambiamento principale in DICE-2016 è il metodo per stimare la funzione di danno. Questa modifica, tuttavia, non influisce sulla nostra analisi, poiché sostituiamo la funzione di danno con una nuova curva. Inoltre, come spiegato di seguito, utilizziamo stime e proiezioni più recenti per aggiornare DICE-2013. Data la natura e l'entità degli aggiornamenti in DICE-2016 e i nostri sforzi di ricalibrazione per incorporare dati recenti, riteniamo che l'utilizzo di DICE-2013 come modello di base per il nostro studio sia giustificabile.

forzare il modello a presupporre sforzi di riduzione delle emissioni molto bassi tra il 2010 e il 2020, apportiamo alcune piccole modifiche per far sì che l'orizzonte di simulazione inizi con l'anno 2020. Alla maggior parte dei parametri assegniamo i loro valori nel 2020 dal modello originale come valore iniziale. Tuttavia, presumiamo un aumento della temperatura media globale al di sopra del livello preindustriale di 1,2 °C entro il 2020 [27](#). Utilizziamo inoltre le proiezioni del PIL dal World Economic Outlook del FMI [40](#) deflazionate ai valori \$US 2005 (l'anno base per tutti i valori in DICE-2013). Questi valori, insieme al rapporto di output delle emissioni equivalenti di CO₂ per il 2020, implicano emissioni industriali di CO₂ pari a 37,52 GtCO₂ nell'anno 2020. Questo numero è leggermente superiore a 36,19 GtCO₂ come previsto per il percorso RCP4.5 [41](#), ma riflette meglio gli ultimi aumenti osservati nelle emissioni globali [42](#). Per aggiornare le emissioni industriali cumulative di carbonio, recuperiamo i dati osservati dal rapporto PBL 2017 [42](#) e interpoliamo linearmente tra l'ultima osservazione nel 2016 e le emissioni previste nel 2020 per ottenere le emissioni per il 2017-2019. Utilizzando il valore del PIL aggiornato nel 2020, aggiustiamo anche il valore del capitale di produzione iniziale. Per coerenza con gli impatti stimati, ricalibriamo il periodo di 5 anni DICE-2013 in una versione a intervalli di tempo annuali con un tempo di esecuzione del modello di 600 anni in totale.

La relazione temperatura-crescita

I costi del riscaldamento sono spesso forniti in termini di cambiamenti contemporanei del PIL [43](#), [44](#), [45](#). Questo approccio statico, tuttavia, omette gli effetti dinamici come i cambiamenti negli investimenti attraverso i quali il cambiamento climatico può influenzare la crescita economica e quindi il PIL futuro [46](#).

Una prima stima di Dell et al. [4](#) (DJO, di seguito) del legame temperatura-crescita rileva una relazione lineare tra crescita e temperatura. Mostra inoltre che solo i paesi poveri soffrono di temperatura. I risultati per i paesi ricchi non sono significativi e non sono conclusivi sul fatto che questi paesi traggano beneficio o soffrano del riscaldamento.

che i risultati inconcludenti riguardanti gli impatti dei paesi ricchi derivano dalla relazione lineare trovata. Secondo le stime di BHM, i paesi poveri si trovano sulla pendenza discendente della relazione concava tra temperatura e crescita. Al contrario, i paesi ricchi sono distribuiti attorno all'ottimo di questa funzione. Una regressione lineare traduce questa relazione in affermazioni (inconcludenti) secondo cui i paesi ricchi non sono affatto vulnerabili o, a seconda della specifica esatta, potrebbero essere leggermente influenzati in modo positivo o negativo.

Le differenze in questi risultati di stima portano a interpretazioni completamente diverse. Mentre DJO prevede che tutti i paesi abbiano una vulnerabilità che diminuisce nel tempo man mano che diventano più ricchi, BHM osserva che i paesi diventano sempre più vulnerabili nel tempo man mano che diventano più caldi in media.

Le stime di DJO hanno accelerato la ricerca su come modellare gli impatti della crescita per la valutazione delle politiche climatiche. I canali attraverso cui il cambiamento climatico può influenzare lo sviluppo economico sono molteplici. Oltre alle riduzioni dirette della produzione che innescano effetti di ordine superiore come la riduzione degli investimenti e quindi alterano le dinamiche della crescita economica, il cambiamento climatico può anche influenzare il progresso della ricerca e rallentare la crescita della produttività totale dei fattori (TFP) o accelerare il deprezzamento dello stock di capitale.

Moore e Diaz⁴⁷ esaminano gli ultimi due percorsi individualmente in un modello DICE a due regioni. Scelgono di applicare le stime DJO che risultano per una risposta ritardata dei costi dei danni alla temperatura. Per questa specifica, le relazioni negative stimate temperatura-crescita per i paesi poveri sono significative al livello del 10 per cento e non significative per i paesi ricchi. Per implementare le stime puntuali, Moore e Diaz applicano fattori di scala costanti al tasso di crescita TFP per riprodurre gli effetti economici totali stimati. Proprio come il nostro studio, Moore e Diaz⁴⁷ scoprono che la politica ottimale stabilizza il riscaldamento globale a 2 °C.

combinando distribuzioni per il collegamento storico temperatura crescita con SSF [25](#) e risultati del modello climatico globale. Similmente a Moore e Diaz [47](#), trasferiscono le loro stime a DICE-2013 tramite un modello esplicito di riduzioni della crescita TFP.

Dietz e Stern [48](#) includono più di un canale di impatto delle riduzioni della crescita e scoprono anche che gli sforzi ottimali di riduzione delle emissioni devono essere notevolmente aumentati. Poiché gli studi empirici non sono stati finora in grado di quantificare in che misura le riduzioni della crescita osservate possono essere ricondotte ai canali potenziali, gli studi che includono più di un canale di impatto devono basarsi su ipotesi per lo più arbitrarie sul contributo dei canali alle riduzioni della crescita.

Guivarch e Pottier [49](#) indagano se certe strutture di danno, ad esempio quelle che implicano che solo la crescita della TFP sia interessata, portino a un costo sociale del carbonio più elevato rispetto al danno sulla produzione stessa. Scoprono che se l'entità complessiva del danno è la stessa, la classificazione tra questi modelli alternativi non è univoca e dipende piuttosto dalla scelta dei parametri di preferenza.

In assenza di un modello completo ed empiricamente convalidato che catturi gli effetti della crescita, ci limitiamo a trovare una funzione di riduzione della produzione, ovvero una funzione di danno, che porta agli stessi effetti di crescita stimati. La nostra funzione di danno serve quindi a emulare gli impatti di crescita stimati, senza tentare di catturare i meccanismi sottostanti. Rispetto a Moore e Diaz [47](#) e Dietz e Stern [48](#), il nostro è un approccio alternativo che non richiede di fare ipotesi arbitrarie. Riteniamo che il nostro approccio aggiunga sostanza alla letteratura riguardante lo sviluppo di funzioni di danno per gli IAM [43](#), [44](#), [45](#). Queste funzioni di danno spesso mancano di recenti prove empiriche, in particolare per quanto riguarda gli impatti di crescita [13](#).

A differenza di Moore e Diaz [47](#) e Lemoine e Kapnick [7](#), le stime che utilizziamo per lo sviluppo della funzione di danno derivano dal lavoro empirico più recente nello

metodologici per stimare gli impatti sulla crescita, in particolare per quanto riguarda la presunta relazione funzionale [50](#), l'importanza dell'uso di variabili meteorologiche per approfondimenti sugli impatti climatici [11](#), [51](#) e su altre sfide metodologiche [9](#). Anche se solo brevi serie temporali e piccoli aumenti della temperatura e di altre variabili meteorologiche [52](#) sono disponibili per la stima, arricchire l'analisi costi-benefici della politica climatica con le prove empiriche attualmente esistenti sugli impatti è un miglioramento necessario e altamente rilevante da apportare [13](#).

Come affermato anche nel testo principale, le implicazioni dei danni futuri che si evolvono secondo le stime BHM sono state finora studiate utilizzando scenari predeterminati di riscaldamento e crescita economica. Un importante contributo di Ricke et al. [9](#) rileva che le stime BHM sono associate a un costo sociale del carbonio piuttosto elevato, il che potrebbe indicare che la politica ottimale dovrebbe essere rigorosa. Burke et al. [8](#) mostrano che vi è una grande potenziale riduzione del danno se l'aumento della temperatura è limitato a 1,5 °C o 2 °C. Ueckerdt et al. [10](#) tengono inoltre conto dei costi di mitigazione in un modello con crescita economica esogena e sviluppo della temperatura. Rispetto a questi contributi, il nostro metodo di sviluppo di una funzione di danno dalle stime BHM all'interno di un IAM consente di mantenere i diversi processi di feedback tra i meccanismi economici e climatici forniti dal modello DICE.

Gli impatti sulla crescita indotti dalla temperatura secondo BHM

Qui forniamo un breve riassunto della stima della relazione tra temperatura e crescita economica su cui basiamo la nostra analisi (per maggiori dettagli vedere Burke et al. [6](#) e il materiale supplementare associato).

Burke et al. [6](#), [8](#) stimano questa relazione per tutti i paesi del mondo sulla base dei dati osservati dal 1960 al 2010 basati sul modello statistico

$$+ \mu(n) + \nu(t) + \theta(n)t + \theta_2(n)t^2 + \epsilon(n, t)$$

(1)

per tutti i paesi n e gli anni considerati t . Le variabili dipendenti sono le prime differenze del logaritmo naturale del PIL reale annuo (aggiustato per l'inflazione) pro capite (essendo la frazione del PIL Y e della popolazione L). Queste prime differenze sono interpretate come tassi di crescita annui del reddito. Le variabili indipendenti sono specifiche funzionali h della temperatura media assoluta regionale T^{ATM} e delle precipitazioni P . Inoltre, i fattori invarianti nel tempo, ad esempio storia e topografia, sono considerati includendo effetti fissi specifici per paese μ . I fattori variabili nel tempo, inclusi shock improvvisi, ad esempio recessioni globali e shock sui mercati energetici, e cambiamenti in lenta evoluzione, ad esempio spostamenti demografici e istituzioni in evoluzione, sono catturati dagli effetti fissi specifici per anno $\nu(t)$ e dalle tendenze temporali specifiche per paese, rispettivamente $\theta(n)t + \theta_2(n)t^2$

Burke et al. [6](#), [8](#) trovano forti prove di una risposta quadratica globale della temperatura secondo

$$h(T^{\text{ATM}}(n, t)) = \beta_1 T^{\text{ATM}}(n, t) + \beta_2 (T^{\text{ATM}}(n, t))^2.$$

(2)

Vengono inoltre testate le specifiche di h con diversa risposta funzionale alla temperatura e non si riscontrano miglioramenti nelle prestazioni di questi modelli alternativi.

Per il campione globale, Burke et al. [8](#) trovano stime statisticamente significative per i parametri nella funzione di risposta della temperatura di $\beta_1 = 0,0127$ e $\beta_2 = -0,0005$ (Extended Data Table [1](#) in Burke et al.). Mentre le stime a livello nazionale fornite da

quindi, costituiscono la nostra calibratura di base.

Burke et al. ⁶ confrontano anche i dati dal 1960 al 1989 con quelli dal 1990 al 2010 e scoprono che la risposta non è cambiata in modo significativo nel tempo. Ciò indica che i processi di adattamento che avrebbero potuto modificare la risposta in passato non sono osservabili nei dati. Inoltre, implica che la risposta degli investimenti al cambiamento climatico attuale o futuro, che influisce sulla crescita economica, non è cambiata qualitativamente nel tempo nonostante la maggiore disponibilità di informazioni sul problema climatico.

In un'analisi globale, Burke et al. ^{6,8} estrapolano la relazione di impatto stimata nel futuro e derivano proiezioni dei livelli futuri di reddito pro capite rispetto a un mondo con temperature fissate alla loro media 1980-2010. In particolare, l'evoluzione del reddito pro capite globale è descritta come

$$\frac{Y(t+1)}{L(t+1)} = \frac{Y(t)}{L(t)} (1 + \eta(t) + \phi(t)).$$

(3)

Qui, η è il tasso di crescita ipotetico in assenza di cambiamenti climatici e $\phi(t)$ l'effetto aggiuntivo del riscaldamento sulla crescita in quell'anno t . Il tasso di crescita $\phi(t)$ è espresso in termini della funzione di risposta stimata h come

$$\phi(t) = h(T^{\text{ATM}}(t)) - h(\bar{T}^{\text{ATM}}),$$

(4)

con che è la temperatura assoluta globale in un anno t e che è la temperatura media 1980-2010. Questa temperatura media rappresenta le condizioni climatiche a cui

Derivazione di una nuova funzione di costo dei danni per DICE

La funzione di impatto climatico $\phi(t)$ non equivale alle funzioni di danno che sono solitamente impiegate negli IAM. Queste funzioni di danno descrivono tipicamente riduzioni del livello del PIL, che possono essere percepite come una riduzione della produttività del lavoro e del capitale. Ciò può essere osservato estendendo la funzione di produzione Cobb-Douglas standard tramite la produttività del lavoro sensibile alla temperatura e la produttività del capitale sensibile alla temperatura come segue: $A^L(T^{\text{ATM}}(t)) A^K(T^{\text{ATM}}(t))$

$$\begin{aligned}
 Y(t) &= A(t) (A^K(T^{\text{ATM}}(t)) K(t))^\gamma (A^L(T^{\text{ATM}}(t)) L(t))^{1-\gamma} \\
 &= \underbrace{A^K(T^{\text{ATM}}(t))^\gamma A^L(T^{\text{ATM}}(t))^{1-\gamma}}_{=f(T^{\text{ATM}}(t))} A(t) K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \\
 &= f(T^{\text{ATM}}(t)) Y^{\text{gross}}(t),
 \end{aligned}$$

(5)

con PIL al lordo degli effetti di livello $Y^{\text{lordo}}(t)$, TFP indipendente dalla temperatura $A(t)$, capitale produttivo $K(t)$, lavoro $L(t)$, elasticità di output del capitale γ e produttività sensibile alla temperatura. Il PIL al netto dei costi dei danni di livello $Y(t)$ corrisponde ai livelli di reddito osservati nell'equazione (3). $f(T^{\text{ATM}}(t))$

A differenza di una funzione di danno di livello, la funzione di impatto climatico $\phi(t)$ è parte del tasso di crescita del PIL e quindi intreccia gli effetti di livello e la risposta agli investimenti che portano agli effetti di crescita. L'utilizzo diretto del tasso di crescita $\phi(t)$ insieme all'Eq. (3) in DICE darebbe luogo a un modello di crescita esogeno, vale a dire a un modello in cui l'investimento è predeterminato e non può essere regolato in modo ottimale. Per mantenere la caratteristica del modello di crescita, cerchiamo una funzione di danno come nell'Eq. (5) che è, insieme agli effetti

A tal fine, convertiamo prima l'aumento di temperatura (in °C dal 1900) calcolato dal modulo climatico in DICE nella temperatura annuale assoluta nella funzione di risposta stimata h secondo $\Delta T^{ATM}(t) T^{ATM}(t)$

$$T^{ATM}(t) = T_{2010}^{ATM} + \Delta T^{ATM}(t) - \Delta T_{2010}^{ATM},$$

(6)

con la temperatura globale assoluta nell'anno 2010 e l'aumento della temperatura media globale nel 2010, Per il 2010, utilizziamo la temperatura media del periodo 2005-2010 per calibrare . I dati per la calibrazione sono compilati da un set di dati NASA [53](#), [54](#) . L'aumento della temperatura media globale nel 2010, , deriva dalla versione originale DICE-2013. Importante per la scelta dell'anno di riferimento, in questo caso il 2010, è la disponibilità dei dati di temperatura richiesti. A parte questo, l'anno di riferimento può essere scelto arbitrariamente. $T_{2010}^{ATM} \Delta T_{2010}^{ATM} \cdot T_{2010}^{ATM}$
 ΔT_{2010}^{ATM}

Per derivare una funzione di danno f coerente con le stime di impatto, utilizziamo un algoritmo iterativo che consente di districare la funzione di perdita di produttività come descritto dall'Eq. (5) dalla risposta all'investimento, entrambe le quali causano congiuntamente l'impatto di crescita $\phi(t)$. Estrapolare la relazione passata tra aumento della temperatura e perdite di produttività nel futuro è un approccio valido solo se l'economia futura e la sua vulnerabilità sono simili a quelle del passato. Per ottenere uno scenario che emula un tale mondo futuro, imponiamo tre ipotesi chiave sulla calibrazione.

In primo luogo, escludiamo l'opzione di ridurre le emissioni e quindi imitiamo l'assenza di qualsiasi sforzo di riduzione delle emissioni degno di nota dal 1980 al 2010. Gli effetti di crescita che potrebbero essere indotti dalla riallocazione delle risorse di investimento agli sforzi di mitigazione possono quindi essere astratti.

osservabile un adattamento degno di nota. Di conseguenza, astraiamo anche dall'adattamento come strumento politico. Similmente alla prima ipotesi, ciò significa che gli effetti di crescita che potrebbero essere derivati dalla riallocazione delle risorse di investimento all'adattamento possono essere ignorati.

In terzo luogo, assumiamo che l'investimento non venga rallentato per ridurre le emissioni in assenza di sforzi di mitigazione. Tuttavia, la decisione di investimento tiene conto dell'emergere di future perdite di produttività che rendono gli investimenti meno redditizi nel tempo. Quindi, l'investimento reagisce alle perdite di produttività, ma non viene utilizzato per la riduzione dei costi dei danni.

In sostanza, la terza ipotesi equivale a postulare che la decisione di investimento venga presa ignorando il nesso temperatura-produttività. Di conseguenza, nell'esecuzione della calibrazione cerchiamo una serie temporale $f(t)$, piuttosto che una funzione dipendente dalla temperatura, che soddisfi

$$f(t+1) \frac{Y^{\text{gross}}(t+1)}{L(t+1)} = \frac{Y(t)}{L(t)} (1 + \eta(t) + \phi(t)).$$

(7)

Per il periodo iniziale approssimiamo con $\phi(t)$ risultante dall'Eq. (4) con la temperatura assoluta iniziale dall'Eq. (6). $f(1) \approx (1 + \phi(1))$

$$T^{\{\text{ATM}\}} \text{sinistra}(1 \text{destra}) T^{\text{ATM}}(1)$$

Prima dell'iterazione, risolviamo il modello senza costi di danni climatici per ottenere il tasso di investimento ottimale in assenza di cambiamenti climatici. s_t^{noCC}

L'iterazione viene quindi eseguita su un set di funzioni con j come numero di passaggi di iterazione. Partendo da , ovvero con danno climatico pari a zero per tutte le temperature, l'iterazione (Fig. 8 supplementare) comprende i seguenti passaggi:

$$f(t)^{(j)} \text{sinistra}(1 \text{destra}) = 1 f(t)^{(1)} = 1$$

evolve dall'equazione (4). Applicando il tasso di investimento a stocche ipotetico tasso di crescita. Valutando l'equazione (7) con η , ϕ , e otteniamo l'effetto effettivo della serie temporale della temperatura sulla crescita nel passo di iterazione j . Si cerca di far convergere questo tasso di crescita, che è influenzato in modo cruciale dalla funzione assunta e dalla risposta all'investimento associata, verso la serie temporale stimata dipendente dalla temperatura data dall'Eq. (4). Pertanto, l'algoritmo di iterazione viene interrotto una volta che la deviazione assoluta media temporale tra i due tassi e ϕ è diventata sufficientemente piccola, qui, inferiore a 6×10^{-5} . Allo stesso tempo, tutte le altre serie temporali, in particolare la risposta all'investimento, la serie temporale della temperatura e la serie temporale del danno, convergono.

$$f(t)^{(j)} \quad f(t)^{(j)} Y^{\text{gross}}(t)^{(j)} \quad Y(t)^{(j)} \quad \phi(t)^{(j)} \quad s_t^{\{\mathrm{nocc}\}}$$

$$Y(t)_{\{\mathrm{sinistra}(j \ \destra)\}} \quad \eta \ \mathrm{sinistra}(t \ \destra)^{\{j\}} \quad f(t+1)_{\{\mathrm{sinistra}(j \ \destra)\}} \quad Y^{\{\mathrm{lordo}\}}(t+1)_{\{\mathrm{sinistra}(j \ \destra)\}} \quad Y(t)_{\{\mathrm{sinistra}(j \ \destra)\}} \quad \eta \ \mathrm{sinistra}(t \ \destra)^{\{j\}} \quad \bar{\phi}(n, t)^{\{j\}} \quad f(t)_{\{\mathrm{sinistra}(j \ \destra)\}} \quad \phi \ \mathrm{sinistra}(t \ \destra)^{\{j\}} \quad \bar{\phi} s_t^{\mathrm{nocc}} \quad Y(t)^{(j)} \quad \eta(t)^{(j)} \quad f(t+1)^{(j)} \quad Y^{\text{gross}}(t+1)^{(j)} \quad Y(t)^{(j)} \quad \eta(t)^{(j)} \quad \bar{\phi}(n, t)^{(j)} \quad f(t)^{(j)} \quad \phi(t)^{(j)} \quad \bar{\phi}$$

In secondo luogo, aggiornando la funzione di danno per il successivo passaggio di iterazione: per derivare da utilizzare nel successivo passaggio di iterazione, utilizziamo nuovamente l'Eq. (7). A differenza del primo passaggio di iterazione, ora calcoliamo i valori della funzione di $f(t+1)$ che soddisfano l'Eq. (7) per le serie temporali η , e utilizzando i tassi di crescita stimati indotti dalla temperatura che evolvono dall'Eq. (4). Utilizziamo la serie temporale risultante, che chiamiamo $\tilde{f}(t)$, per aggiornare la funzione di danno per il successivo passaggio di iterazione secondo

$$f(t)^{(j+1)} \quad Y^{\{\mathrm{lordo}\}}(t)_{\{\mathrm{left}(j \ \right)\}} \quad Y(t)_{\{\mathrm{left}(j \ \right)\}} \quad \eta \ \mathrm{left}(t \ \right)^{\{j\}} \quad \phi \ \mathrm{left}(t \ \right)^{\{j\}} \quad \tilde{f}(t) \quad Y^{\text{gross}}(t)^{(j)} \quad Y(t)^{(j)} \quad \eta(t)^{(j)} \quad \phi(t)^{(j)} \quad \tilde{f}(t)$$

$$f(t)^{(j+1)} = f(t)^{(j)} + \frac{\tilde{f}(t) - f(t)^{(j)}}{2}.$$

di questa funzione, è stato postulato che la decisione di investimento viene presa ignorando il nesso temperatura-produttività. Questa ipotesi richiede di cercare una serie temporale piuttosto che una funzione dipendente dalla temperatura. Per le esecuzioni di simulazione, tuttavia, torniamo alla narrazione originale della funzione di danno in DICE. Di conseguenza, la differenza notevole tra l'esecuzione di calibrazione del danno e le esecuzioni di simulazione è che le decisioni ottimali ora incorporano completamente le informazioni sui futuri costi del danno climatico. In particolare, la decisione di investimento tiene conto dei costi che questo investimento alla fine causa, il che richiede di avere una funzione dipendente dalla temperatura. La dipendenza dalla temperatura è fondamentale per scegliere il percorso di temperatura ottimale. Colleghiamo quindi le informazioni fornite dalla serie temporale con l'aumento di temperatura della stessa iterazione. Lo facciamo esprimendo che il danno osservato nell'iterazione è causato dall'aumento di temperatura in quel momento. Se, ad esempio, nel 2030 si verifica un danno del 10% e nello stesso anno la temperatura aumenta di 1,5 °C, allora la funzione dipendente dalla temperatura trasmette l'informazione che un aumento della temperatura di 1,5 °C implica costi di danno del 10%, indipendentemente dalla tempistica. Di conseguenza, se il riscaldamento di 1,5 °C si verifica in un momento diverso nelle esecuzioni di simulazione rispetto all'esecuzione di calibrazione del danno, allora è comunque associato a una perdita del 10%. Ciò significa che la funzione di danno non riproduce le stime di crescita di BHM per nessun altro scenario diverso dall'esecuzione di calibrazione che emula le condizioni per cui è giustificabile l'estrapolazione delle stime.

$$f(t)^{(j_{\text{last}})} \Delta T(t)^{\text{ATM},(j_{\text{last}})} f(t)^{(j_{\text{last}})}$$

In breve, per ogni passo temporale t , , specifichiamo con $f(t)^{(j_{\text{last}})}$, ovvero il valore della funzione di $f(t)^{(j_{\text{last}})}$ è ora definito in t e non in t . Proprio come $f(t)^{(j_{\text{last}})}$, questa funzione è discreta in 600 punti. Nelle esecuzioni di simulazione, interpoliamo questa funzione linearmente tra questi punti. Questa procedura ha il vantaggio che non dobbiamo fare alcuna ipotesi, al contrario dell'approssimazione che richiederebbe di

sufficiente di punti per mantenere la non linearità della funzione nonostante

l'interpolazione lineare. Questa nuova funzione sostituisce quindi la funzione di

$$f(\Delta T(t)^{ATM}) := f(t)^{(j_{last})} f(t)^{(j_{last})} \Delta T^{ATM} f(t)_{\{j_{\{\mathit{ultimo}\}}\}} \\ f(t)^{(j_{last})}$$

Solidità dei risultati

Di seguito, sottoponiamo i nostri risultati a test di robustezza estesi. Innanzitutto, aggiungiamo all'analisi di sensibilità climatica del testo principale tenendo conto di un'intera funzione di densità di probabilità per i valori ECS. In secondo luogo, esaminiamo le implicazioni dell'incertezza nelle stime di BHM. A questo proposito, teniamo conto di stime alternative di β_1 e β_2 da un lato e di diverse specifiche del modello dall'altro. Questa analisi è seguita da un confronto con le stime DJO. In terzo luogo, esaminiamo l'influenza dell'incertezza sul futuro socioeconomico ricalibrando il modello DICE in base a un set selezionato di SSP. Come sottoprodotto di questa calibrazione, otteniamo funzioni di costo di mitigazione che emulano i costi da un modello di processo dettagliato e rappresentano quindi un altro avanzamento del modello DICE. La derivazione di queste funzioni ci consente di testare la sensibilità dei nostri risultati rispetto a questi costi alternativi di riduzione delle emissioni. Completiamo questa sezione fornendo maggiori informazioni sul test di robustezza rispetto ai parametri di preferenza mostrati nel testo principale.

Robustezza rispetto a ECS

Qui, estendiamo l'analisi dell'incertezza rispetto ai valori ECS come mostrato nella Fig. 1. A tal fine, impieghiamo una distribuzione di probabilità dei valori ECS che è stata stimata da una serie di simulazioni GCM (cfr. Figura 3 (A) in Roe e Baker [26](#) e Fig. supplementare [9](#)).

La distribuzione risultante delle temperature economicamente ottimali nel 2100 eredita proprietà dalla distribuzione di probabilità ECS. Come mostrato anche nel

politica climatica. Inoltre, l'analisi di sensibilità più dettagliata conferma che gli obiettivi di temperatura più probabili si aggirano intorno ai 2 °C. Tuttavia, c'è una certa, seppur molto piccola, possibilità che l'obiettivo di temperatura economicamente ottimale possa essere significativamente più alto, forse fino a 4 °C. La probabilità per questi obiettivi elevati tuttavia diminuisce considerevolmente per tutti i valori ECS oltre i 4 °C. Di conseguenza, le probabilità di coda degli alti valori ECS vengono trasmesse alla distribuzione delle temperature ottimali nel 2100.

Robustezza rispetto alla funzione di danno stimato

Per quantificare l'incertezza nelle stime di β_1 e β_2 nell'Eq. (2), Burke et al. [8](#) implementano strategie di bootstrapping basate sul campionamento per paese, per anno e per blocchi di cinque anni. Eseguono il campionamento per paese estraendo con sostituzione dal loro elenco di 165 paesi un totale di 165 paesi e ristimano la funzione di risposta con tale set. Questo metodo di campionamento consente la correlazione nei residui all'interno dei paesi nel tempo. Allo stesso modo, eseguono il campionamento negli anni e nei blocchi di cinque anni, il che consente la correlazione trasversale nei residui in un dato anno e la dipendenza temporale e trasversale nei residui, rispettivamente.

Utilizziamo questi tre metodi per la nostra analisi dell'incertezza nella funzione di risposta stimata. Per ogni strategia di bootstrapping, estraiamo 1000 campioni. Per ogni campione ricaviamo le stime per β_1 e β_2 , applichiamo l'iterazione sulle funzioni di danno per la nuova funzione di risposta h e utilizziamo la funzione risultante nelle esecuzioni della policy. I risultati per le tre diverse strategie di bootstrapping sono illustrati rispettivamente nella Fig. [3](#) e nelle Fig. supplementari [1](#) e [2](#).

Nonostante la sostanziale incertezza nelle stime di impatto, il 40% delle esecuzioni di ensemble per ECS di 2,9 °C mostra un riscaldamento ottimale al di sotto di 2 °C (Fig. [10](#) supplementare). Questa quota aumenta rapidamente per obiettivi di riscaldamento leggermente superiori. Nessuna delle curve danno-costi implica 2 °C

Inoltre, esaminiamo la sensibilità dei nostri risultati alla specifica del modello BHM (Fig. 4). La specifica principale BHM, che è anche la specifica principale nel nostro studio, non tiene conto della possibilità di una risposta economica che è in ritardo nella temperatura, né differenzia tra le risposte rispetto ai livelli di reddito. BHM ha testato queste specifiche alternative con i seguenti risultati.

Specificazione di lungo periodo aggregata: il test con termini ritardati mostra che la risposta sul PIL aggregato, o globale, diventa sostanzialmente più negativa, perché le regioni più fredde non traggono più univocamente vantaggio dal riscaldamento. Tuttavia, poiché tenere conto di più ritardi rende la stima più incerta, BHM non respinge né l'ipotesi di un effetto di temperatura di breve periodo, o istantaneo, né l'ipotesi di una risposta di lungo periodo, o ritardata.

Specificazione differenziata a breve termine: poiché il lavoro pionieristico di DJO indica che il livello di reddito è il fattore determinante dell'impatto sul PIL, BHM rivaluta anche la risposta per i paesi ricchi e poveri separatamente. Si osserva che l'optimum della funzione di risposta dei paesi poveri si verifica per una temperatura più alta rispetto al campione globale aggregato. Di conseguenza, la risposta cumulativa è inferiore rispetto alla specificazione principale. Mentre la risposta dei paesi ricchi risulta essere significativamente diversa da zero, l'adeguamento dei parametri effettuato per i paesi poveri, tuttavia, non è significativo. Di conseguenza, a differenza di DJO, BHM non può rifiutare l'ipotesi che i paesi ricchi e poveri abbiano la stessa funzione di risposta.

Specificazione differenziata a lungo termine: BHM testa anche un modello che tiene conto degli effetti ritardati e distingue tra paesi ricchi e poveri. Proprio come nella specificazione differenziata a breve termine, la differenziazione rispetto al reddito rende la risposta cumulativa più piccola rispetto alla funzione di risposta a lungo termine aggregata. Tuttavia, la suddivisione del campione in paesi ricchi e poveri e la contabilizzazione di parametri incerti aggiuntivi per catturare gli effetti a lungo termine producono un'incertezza di proiezione complessiva elevata.

risultati a questi modelli alternativi.

A questo scopo, espandiamo l'equazione (2) con i termini corrispondenti che descrivono i ritardi e/o la quota di PIL dei paesi ricchi e poveri. La quota di PIL è modellata come una funzione linearmente decrescente come descritto in dettaglio di seguito. Come sostenuto anche lì, la differenziazione rispetto al livello di reddito richiederebbe preferibilmente un modello a due regioni. Con un IAM globale cerchiamo invece di generare una funzione di danno che si aggrega sui diversi impatti per i paesi ricchi e poveri. Facciamo quindi ipotesi sulla quota dei poveri nel PIL globale. Sebbene questa modellazione sia certamente una soluzione improvvisata, serve a fornire un'impressione di come le diverse vulnerabilità influenzino la soluzione ottimale. I nostri test con diverse specifiche per la quota dei paesi poveri nel PIL globale mostrano solo cambiamenti marginali nei risultati, poiché le perdite di PIL dei paesi poveri sono piccole in numeri assoluti per tutte le specifiche. L'unica eccezione a questo è il caso in cui la quota di PIL dei paesi poveri aumenta in modo significativo. Poiché finora è stato osservato che questa quota nel PIL globale diminuisce nel tempo, crediamo che la nostra ipotesi di una quota linearmente decrescente sia fattibile.

Come previsto, le temperature ottimali implicite di fine secolo per le diverse specifiche del modello riflettono i risultati di BHM (Fig. 4 e Fig. supplementari 3–5). Come mostrato da BHM, la specifica differenziata a breve termine implica perdite meno gravi. Di conseguenza, i nostri risultati riflettono che le temperature di fine secolo economicamente ottimali risultano essere più elevate. Al contrario, le altre due specifiche, che sono associate a costi di danno più elevati, implicano che gli sforzi di mitigazione devono essere ulteriormente rafforzati. Per una sensibilità climatica di 2,9 °C, limitare l'aumento della temperatura ben al di sotto di 2 °C è ottimale in base a queste specifiche del modello.

Sebbene basate sullo stesso set di dati, diverse specifiche del modello possono implicare discrepanze significative nelle stime. Poiché le stime dei costi dei danni

Tuttavia, poiché tre specifiche del modello su quattro implicano un obiettivo di temperatura economicamente ottimale di 2 °C o addirittura inferiore per una sensibilità climatica di 2,9 °C, consideriamo i nostri risultati relativamente robusti alle diverse specifiche del modello BHM.

Confronto con la stima DJO

Come descritto sopra, il lavoro pionieristico di DJO descrive la relazione tra temperatura e crescita come lineare e rivela che solo i paesi poveri soffrono di temperatura. Tuttavia, i risultati per i paesi ricchi non sono statisticamente significativi con stime puntuali che vanno da leggermente positive nella specificazione zero-lag a leggermente negative nella specificazione 5-lag.

Sebbene il nostro studio si basi sulle stime più recenti del BHM, che mostrano una relazione non lineare tra aumento della temperatura e crescita economica, qui verifichiamo se i nostri risultati riguardanti la temperatura ottimale di fine secolo potrebbero valere anche per i risultati della stima del DJO.

Come indicato sopra, le diverse specifiche delle regressioni DJO potrebbero portare a risultati molto diversi. Finora, gli studi hanno utilizzato diverse specifiche della regressione DJO e non concordano sulla questione se le stime per i paesi ricchi abbiano un valore informativo sufficiente per essere utilizzate per l'analisi. Ad esempio, Moore e Diaz⁴⁷ utilizzano le stime per la specificazione 10-lag che fornisce una relazione negativa tra temperatura e crescita per i paesi ricchi. Ricke et al.⁹ includono la specificazione 0-lag e ignorano la relazione di impatto positivo per i paesi ricchi. Per un quadro completo, mostriamo qui i risultati per tutte le specifiche lag fornite da DJO con e senza impatti dei paesi ricchi (Fig. 4 e Fig. 6 supplementare).

Questa analisi, tuttavia, deve essere trattata con cautela. L'obiettivo del nostro studio è generare una funzione di danno per un IAM globale come DICE. L'implementazione delle stime di DJO, tuttavia, richiede un modello con almeno due regioni, preferibilmente con ponderazione del benessere implementata nell'ottimizzazione.

IL GLOBALE.

Per implementare le stime DJO, modifichiamo $\phi(t)$ nell'Eq. (3) in e lasciamo che il coefficiente differisca per i paesi ricchi e poveri. Inoltre, poiché DICE non può tracciare quanti paesi sono poveri o ricchi, imponiamo ipotesi sulla quota del PIL dei paesi poveri nel PIL globale. Con questa quota, possiamo estendere l'Eq. (3) a

$$\phi(t) = \delta \Delta T(t+1)^{\text{ATM}} \delta \zeta(t)$$

$$\frac{Y(t+1)}{L(t+1)} L(t) = \sigma(t) Y(t) (1 + \eta(t) + \phi(t)^{\text{poor}}) + (1 - \sigma(t)) Y(t) (1 + \eta(t) + \phi(t)^{\text{rich}})$$

(9)

con e che descrivono le specificazioni alternative di $\phi(t)$ rispettivamente per i paesi poveri e ricchi. Questa equazione di crescita suddivide il PIL globale nel PIL dei paesi poveri e ricchi e agisce quindi come un ripiego per ottenere un'idea approssimativa degli effetti in un modello a due regioni con ponderazione del benessere sofisticata⁴⁷. $\phi(t)^{\text{poor}} \phi(t)^{\text{rich}}$

Supponiamo che diminuisca linearmente con il PIL pro capite globale. Per la povertà definita come in DJO, ovvero avere un PIL pro capite aggiustato per il PPP al di sotto della mediana nel primo anno in cui il paese entra nel set di dati, questo sviluppo è osservabile nei dati⁴⁰ degli ultimi decenni. Poiché fa solo un'affermazione sul contributo relativo dei paesi poveri al PIL globale, diverse narrazioni sul mondo futuro sono conciliabili con la nostra scelta di modellazione. Ad esempio, la crescente prosperità globale potrebbe essere associata a un numero sempre maggiore di paesi che superano la loro povertà e presuppongono la vulnerabilità dei paesi ricchi. In alternativa, i paesi ricchi potrebbero diventare ancora più ricchi, mentre i paesi poveri non prosperano affatto o diventano ancora più poveri. $\sigma(t) \sigma(t)$

calcolato da DICE, per il 2050, sebbene la quota del PIL dei paesi poveri diminuisca, assumiamo che la povertà non sarà mai completamente sradicata nel giro di molti decenni. $\sigma(t) = 0$.

linearmente decrescente implica che se la prosperità globale aumenta, ceteris paribus, il PIL globale diventa meno sensibile alla temperatura. Confrontiamo questa simulazione con uno scenario in cui il valore per il 1980 non diminuisce, ovvero assumiamo $\sigma(t) = \sigma^{1980} \approx 0.1272$

Le specifiche alternative di DJO che testiamo qui non implicano risultati virtualmente diversi rispetto al presunto (Fig. supplementare 6). La ragione di ciò è che il contributo dei paesi poveri è piccolo per entrambe le specifiche per σ . Tuttavia, ciò significa che il trattamento degli impatti stimati dei paesi ricchi è più importante. Nella specificazione 0-lag e 1-lag, la quota maggiore del PIL generato dai paesi ricchi è influenzata positivamente dal riscaldamento. In questo caso, la temperatura BAU di fine secolo è ottimale. Al contrario, escludendo i risultati di stima non significativi dalla calibrazione del danno si ottengono temperature ottimali che sono solo leggermente superiori rispetto al modello BHM. Una situazione diversa si verifica per la specificazione 5- e 10-lag. Includere la relazione di impatto negativo per i paesi ricchi indica l'ottimalità di temperature significativamente inferiori rispetto alle stime BHM. Le stime DJO implicano quindi risultati ampiamente diversi, che vanno da 1,7 °C a 4 °C di riscaldamento ottimale. La maggior parte dei risultati, tuttavia, si colloca in un intervallo tra 1,7 °C e 2,3 °C (Fig. 4). $\sigma(t)$

Incertezza rispetto ai futuri socioeconomici alternativi

In questa sezione, esaminiamo la sensibilità dei nostri risultati a ipotesi alternative sul futuro socioeconomico. Per facilitare l'analisi delle vulnerabilità determinate socioeconomicamente, gli SSP sono stati sviluppati per descrivere possibili sviluppi futuri che insieme determinano sfide diverse per la mitigazione e l'adattamento [55](#).

con l'elasticità del capitale che descrive la divisione del reddito tra capitale e lavoro.

Qui, limitiamo il nostro studio di sensibilità a un set selezionato di SSP, ovvero SSP1 (Sostenibilità: prendere la strada verde), SSP2 (Middle of the Road) e SSP5 (Sviluppo a combustibili fossili) per ottenere una buona impressione di come le sfide alternative per la riduzione delle emissioni influenzino i risultati ottimali in termini di costi-benefici. Ignoriamo SSP3 (Rivalità regionale) e SSP4 (Disuguaglianza) poiché crediamo che i problemi indotti dalla crescente frammentazione regionale rappresentata e i conseguenti ostacoli all'adattamento meritino una modellazione più esplicita di quanto non sia attualmente il caso in DICE.

Per ricalibrare DICE in base a questi SSP, utilizziamo i dati (fino al 2100) degli scenari integrati energia-territorio-economia-clima generati dal modello REMIND-MAGPIE ⁵⁶. REMIND-MAGPIE appartiene agli IAM con una descrizione dettagliata del settore energetico che sono stati scelti per tradurre le narrazioni SSP in proiezioni quantitative ²⁵. Come risultato del processo di interpretazione delle narrazioni e dei diversi design del modello, ogni modello IAM presenta interpretazioni alternative degli SSP. Per ogni SSP, è stato selezionato un IAM diverso per generare il cosiddetto Marker Scenario. Per il nostro esercizio di calibrazione, non attingiamo all'output di simulazione dai diversi modelli di marker, ma optiamo per l'affidamento ai dati generati da un solo modello per evitare problemi di compatibilità. Finora, SSP1, SSP2 e SSP5 sono stati esaminati con REMIND. Gli scenari calcolati consistono in linee di base in cui la politica climatica è assente e in run in cui gli sforzi di mitigazione sono conformi ai Representative Concentration Pathways (RCP). Per questo, è stato sviluppato un nuovo RCP intermedio di $3,4 \text{ W m}^{-2}$ a causa della sua importanza per esplorare la raggiungibilità dell'obiettivo di $2 \text{ }^\circ\text{C}$ ²⁵.

Adottiamo la serie temporale della popolazione data e manteniamo la popolazione costante dopo il 2100. Sebbene questa ipotesi sia certamente lontana dall'essere realistica, serve a distinguere i diversi scenari in termini di diverse dimensioni della popolazione. Seguiamo Leimbach et al. ⁵⁷ assumendo un'elasticità del capitale di 0,35 per SSP1 e SSP2 e un valore più alto di 0,45 per SSP5. Adottiamo anche il loro livello di

7. Insieme alla serie temporale dell'IE di base utilizziamo questa nuova parametrizzazione per derivare una serie temporale TFP corrispondente nel modello Ramsey senza cambiamenti climatici. Utilizziamo quindi questa serie temporale per adattare i parametri che descrivono lo sviluppo TFP in DICE (Fig. [6b](#)). Ricalchiamo anche i parametri dei costi di mitigazione DICE utilizzando i costi di mitigazione dagli scenari SSP. I costi di mitigazione in REMIND-MAGPIE sono uguali alla riduzione del PIL rispetto al caso di base [58](#). L'intensità di carbonio necessaria per questo adattamento e per le esecuzioni dello scenario risulta dalla divisione delle emissioni di base per il PIL di base. Contrariamente alla funzione originale di costo di mitigazione in DICE, le funzioni di mitigazione risultanti sono quindi calibrate rispetto a un modello di processo dettagliato (Fig. [6c](#)).

Le condizioni socioeconomiche descritte da SSP1 e SSP2 lasciano un margine di manovra sufficiente per puntare a temperature ottimali di fine secolo ben al di sotto dei 2 °C (Fig. [6a](#)). Al contrario, lo sviluppo basato sui combustibili fossili descritto da SSP5 rende molto più difficile una politica climatica di successo e implica temperature ottimali di fine secolo intorno ai 2,5 °C.

Poiché abbiamo calibrato le funzioni di costo di mitigazione per simulazioni in cui vengono impiegate tecnologie a emissioni negative, testiamo anche la sensibilità dei nostri risultati rispetto alla disponibilità di tecnologie a emissioni negative in questo secolo. Per semplificare le cose, assumiamo che la potenziale disponibilità non aumenti nel tempo. Tuttavia, il potenziale di mitigazione completo non è assunto istantaneamente nelle nostre simulazioni, piuttosto aumenta nel tempo. Queste simulazioni mostrano che è ottimale sfruttare il potenziale di mitigazione aumentato per ridurre ulteriormente le temperature alla fine del secolo (Fig. [6d](#) supplementare).

Le condizioni socioeconomiche future svolgono certamente un ruolo importante per la progettazione ottimale delle politiche, ma non alterano il messaggio che gli sforzi di mitigazione dovrebbero essere molto rigorosi per avvicinarsi o addirittura

Sensibilità ai costi di mitigazione alternativi

La modellazione dei processi di mitigazione in DICE è spesso considerata troppo semplice [47](#), perché la funzione di costo non è calibrata rispetto a un modello di processo dettagliato, non vi è alcun vincolo di espansione per la riduzione delle emissioni [59](#), [60](#), e non influisce sui fattori di produzione o sulla produttività totale dei fattori (TFP) [61](#).

Qui, non è nostra intenzione affrontare queste carenze. Piuttosto, miriamo a esaminare la sensibilità dei nostri risultati a funzioni alternative di costo di mitigazione. Per questo, lasciamo invariata l'impostazione socioeconomica originale del nostro modello DICE e implementiamo le tre funzioni di costo di mitigazione che abbiamo ricalibrato rispetto a un modello di processo per l'analisi di sensibilità SSP (vedi sopra). Inoltre, controlliamo l'incertezza nella nostra procedura di calibrazione. Lo facciamo utilizzando la varianza della stima del parametro e il valore ottimale stimato per derivare distribuzioni normali per ciascun parametro e ciascun SSP. Da ciascuna di queste distribuzioni campionamo 1000 set di parametri, ovvero 1000 funzioni alternative di costo di mitigazione.

Abbiamo scoperto che l'accordo di Parigi è anche ottimale in termini di costi-benefici quando si assumono queste tre funzioni di mitigazione-costi (Fig. [7](#)). La dispersione nei risultati per ogni SSP è piuttosto piccola, dimostrando che i potenziali errori nell'adattamento sono trascurabili per i risultati.

Il motivo di questa elevata robustezza rispetto ai costi di mitigazione è il significativo aumento dei danni marginali per temperature più elevate e il comportamento funzionale universale dei costi di mitigazione in prossimità delle temperature attuali (cfr. Fig. [1](#)).

Informazioni di base sulle preferenze sociali

temporale sociale ρ viene utilizzato per assegnare un peso diverso all'utilità U del consumo pro capite in diversi punti temporali nella funzione di benessere complessivo. In DICE, questa funzione di benessere sociale W è data da $c_t = \frac{C_t}{L_t}$ $t \in [1, T]$

$$W = \sum_{t=1}^T \left(\frac{1}{1 + \rho} \right)^{t-1} L_t U(c_t).$$

(10)

In altre parole, ρ è correlato all'impazienza nel consumo; un IRSTP più alto dà più enfasi all'utilità presente piuttosto che a quella futura. In tal caso, la società è incline a consumare di più oggi e a investire meno per il potenziale di consumo futuro.

L'elasticità dell'utilità marginale del consumo θ , $\theta \geq 0$, determina il guadagno di utilità dovuto al consumo aggiuntivo, indipendentemente dal momento della sua comparsa. Entra nella funzione di utilità come

$$U(c_t) = \begin{cases} \frac{c_t^{1-\theta}}{1-\theta} & \text{for } \theta \neq 1 \\ \ln c_t & \text{for } \theta = 1. \end{cases}$$

(11)

La calibrazione di questi parametri è discussa in modo controverso nell'economia del clima in quanto riflettono sia il modo in cui le decisioni devono essere formate in base a preoccupazioni etiche, sia il modo in cui le decisioni vengono effettivamente prese. Le considerazioni etiche sono, ad esempio, riflesse da un IRSTP quasi pari a zero, in quanto assegna al consumo delle generazioni future una rilevanza simile al consumo della generazione attuale [24](#), [62](#). Al contrario, la scelta di un tasso più elevato riflette il fatto che le persone di solito preferiscono consumare oggi piuttosto che posticiparlo.

avvia il consumo aggiuntivo per il benessere della società — .

Insieme, questi due parametri descrivono il tasso di sconto equivalente al welfare sociale r , che converte una variazione marginale del consumo futuro al tempo t nella variazione marginale equivalente al welfare del consumo corrente data da

$$\frac{\partial W_1}{\partial C_1} = (1 + r)^t \frac{\partial W_1}{\partial C_t}.$$

(12)

Da questa relazione si può ricavare l'equazione di Ramsey che collega i due parametri con il tasso di sconto r come segue

$$r \approx \rho + \theta g$$

(13)

con il tasso di crescita dei consumi g (cfr. Goulder e Williams [64](#)).

Le equazioni ([11](#)) e ([12](#)) illustrano che i due parametri influenzano il peso del benessere delle generazioni future per la politica odierna. In particolare, influenzano l'importanza della protezione dagli impatti climatici futuri per la politica odierna, soppesando i benefici che le società future sperimenterebbero rispetto ai costi di riduzione delle emissioni che la generazione odierna dovrebbe sostenere. La scelta dei loro valori è quindi fondamentale per le valutazioni della politica sui cambiamenti climatici. Inoltre, l'equazione ([12](#)) mostra che influenzano anche l'equilibrio tra consumo ottimale e quindi investimento indirettamente ottimale e possono quindi modificare gli effetti di crescita che sono fondamentali per i nostri risultati.

preferenza siano scelti simultaneamente in modo che il tasso di sconto risultante rifletta il comportamento osservato rivelato dai tassi di interesse di mercato. Al contrario, i prescrittivist²⁴ percepiscono la calibrazione dei due parametri come una questione etica. Seguendo ora l'approccio prescrittivo, teniamo conto di un'ampia gamma di valori possibili. I risultati di questo test di sensibilità sono mostrati nella Fig. 5 e descritti nel testo principale. Come spiegato sopra, gli obiettivi di temperatura per piccoli tassi di sconto potrebbero essere stimati come troppo elevati a causa della riproduzione carente delle dinamiche del ciclo del carbonio in DICE. Poiché questi obiettivi sono ben al di sotto di 2 °C, questo errore implicito non contraddice la nostra conclusione generale secondo cui l'accordo di Parigi potrebbe essere ottimale in termini di costi-benefici.

Riepilogo della segnalazione

Ulteriori informazioni sulla progettazione della ricerca sono disponibili nel [Nature Research Reporting Summary](#) collegato a questo articolo.

Disponibilità dei dati

I set di dati generati e analizzati durante questo studio, compresi i dati mostrati nelle figure, sono disponibili su richiesta presso gli autori.

Disponibilità del codice

Il codice utilizzato in questo studio è disponibile su richiesta agli autori.

Riferimenti

[agreement/the-paris-agreement](#) (2015).

2. Hallegatte, S. et al. Mappatura della sfida del cambiamento climatico. *Nat. Clim. Chang.* **6** , 663–668 (2016).

3. La massima ambizione climatica necessita di un solido supporto di ricerca. *Nature* **537** , 585–586 (2016).

4. Dell, M., Jones, BF e Olken, BA Shock termici e crescita economica: evidenze dell'ultimo mezzo secolo. *Am. Econ. J. Macroecon.* **4** , 66–95 (2012).

5. Auffhammer, M., Hsiang, SM, Schlenker, W. & Sobel, A. Utilizzo di dati meteorologici e output di modelli climatici in analisi economiche del cambiamento climatico. *Rev. Environ. Econ. Policy* **7** , 181–198 (2013).

6. Burke, M., Hsiang, SM & Miguel, E. Effetto non lineare globale della temperatura sulla produzione economica. *Nature* **527** , 235–239 (2015).

7. Lemoine, D. & Kapnick, S. Un approccio top-down per la proiezione degli impatti di mercato del cambiamento climatico. *Nat. Clim. Chang.* **6** , 51–55 (2016).

8. Burke, M., Davis, WM e Diffenbaugh, NS Ampia potenziale riduzione dei danni economici in base agli obiettivi di mitigazione delle Nazioni Unite. *Nature* **557** , 549–553 (2018).

10. Ueckerdt, F. et al. Il limite di riscaldamento economicamente ottimale del pianeta. *Earth Syst. Dyn.* **10** , 741–763 (2019).
11. Mendelsohn, R. Misurazione degli impatti meteorologici mediante dati panel. In *ASSA Annual Meeting 2017* (American Economic Association 2016).
12. Burke, M. et al. Opportunità di progressi nell'economia del cambiamento climatico. *Science* **352** , 292–293 (2016).
13. Diaz, D. & Moore, F. Quantificazione dei rischi economici del cambiamento climatico. *Nat. Clim. Chang.* **7** , 774–782 (2017).
14. Waldhoff, S., Anthoff, D., Rose, S. & Tol, RSJ I costi marginali del danno di diversi gas serra: un'applicazione di FUND. *Econ. Open-Access, Open-Assess. EJ.* **8** , 1 (2014).
15. Hope, C. L'impatto marginale della CO₂ da PAGE2002: un modello di valutazione integrato che incorpora i cinque motivi di preoccupazione dell'IPCC. *Integr. Assess.* **6** , 19–56 (2006).
16. Nordhaus, W. *Il casinò del clima: rischio, incertezza ed economia per un mondo che si riscalda* (Yale University Press, 2013).
17. Governo, IWG sul documento di supporto tecnico del SC del CUS : *costo sociale del carbonio per l'analisi dell'impatto normativo ai sensi dell'ordine esecutivo*

18. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon; United States Government. *Technical Support Document: Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis Under Executive Order 12866* (2016).
19. Greenstone, M., Kopits, E. & Wolverton, A. Developing a social cost of carbon for US Regulatory Analysis: a methodology and interpretation. *Rev. Environ. Econ. Policy* **7**, 23–46 (2013).
20. Nordhaus, W. D. *A Question of Balance* (Yale University Press, 2008).
21. Nordhaus, W. D. Revisiting the social cost of carbon. *Proc. Natl Acad. Sci.* **114**, 1518–1523 (2017).
22. Revesz, R. L. et al. Global warming: Improve economic models of climate change. *Nature* **508**, 173–175 (2014).
23. Rose, S. K., Diaz, D. B. & Blanford, G. J. Understanding the social cost of carbon: a model diagnostic and inter-comparison study. *Clim. Chang. Econ.* **08**, 1750009 (2017).
24. Stern, N. *The Economics of Climate Change* (Cambridge University Press, 2007).

-
26. Roe, G. H. & Baker, M. B. Why Is Climate Sensitivity So Unpredictable? *Science* **318**, 629–632 (2007).
-
27. IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge University Press, 2013).
-
28. Dasgupta, P. Discounting climate change. *J. Risk Uncertain.* **37**, 141–169 (2008).
-
29. IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014).
-
30. Hallegatte, S. An adaptive regional input-output model and its application to the assessment of the economic cost of Katrina. *Risk. Anal.* **28**, 779–799 (2008).
-
31. Levermann, A. Make supply chains climate-smart. *Nature* **506**, 27–29 (2014).
-
32. Wenz, L. & Levermann, A. Enhanced economic connectivity to foster heat stress-related losses. *Sci. Adv.* **2**, e1501026 (2016).
-
33. Willner, S. N., Otto, C. & Levermann, A. Global economic response to river floods. *Nat. Clim. Chang.* **8**, 594–598 (2018).
-

-
35. Lenton, T. M. & Ciscar, J.-C. Integrating tipping points into climate impact assessments. *Clim. Change* **117**, 585–597 (2013).
-
36. Lamontagne, J. R., Reed, P. M., Marangoni, G., Keller, K. & Garner, G. G. Robust abatement pathways to tolerable climate futures require immediate global action. *Nat. Clim. Chang.* **9**, 290–294 (2019).
-
37. van Vuuren, D. P. et al. How well do integrated assessment models simulate climate change? *Clim. Change* **104**, 255–285 (2011).
-
38. Hof, A. F. et al. The benefits of climate change mitigation in integrated assessment models: the role of the carbon cycle and climate component. *Clim. Change* **113**, 897–917 (2012).
-
39. Glotter, M. J., Pierrehumbert, R. T., Elliott, J. W., Matteson, N. J. & Moyer, E. J. A simple carbon cycle representation for economic and policy analyses. *Clim. Change* **126**, 319–335 (2014).
-
40. International Monetary Fund. World Economic Outlook Database. <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2018/02/weodata/index.aspx> (2018).
-
41. Meinshausen, M. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change* **109**, 213–241 (2011).
-

-
43. Pindyck, R. S. The social cost of carbon revisited. *J. Environ. Econ. Manag.* **94**, 140–160 (2019).
-
44. Nordhaus, W. D. & Moffatt, A. A survey of global impacts of climate change: replication, survey methods, and a statistical analysis. *SSRN Electron. J.* (2017).
-
45. Howard, P. H. & Sterner, T. Few and not so far between: a meta-analysis of climate damage estimates. *Environ. Resour. Econ.* **68**, 197–225 (2017).
-
46. Fankhauser, S. & Tol, R. S. J. On climate change and economic growth. *Resour. Energy Econ.* **27**, 1–17 (2005).
-
47. Moore, F. C. & Diaz, D. B. Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nat. Clim. Chang.* **5**, 127–131 (2015).
-
48. Dietz, S. & Stern, N. Endogenous growth, convexity of damage and climate risk: how Nordhaus' framework supports deep cuts in carbon emissions. *Econ. J.* **125**, 574–620 (2015).
-
49. Guivarch, C. & Pottier, A. Climate damage on production or on growth: what impact on the social cost of carbon? *Environ. Model. Assess.* **23**, 117–130 (2018).
-

(2018).

-
51. Hsiang, S. Climate econometrics. *Annu. Rev. Resour. Econ.* **8**, 43–75 (2016).
-
52. Letta, M. & Tol, R. S. J. Weather, climate and total factor productivity. *Environ. Resour. Econ.* **73**, 283–305 (2019).
-
53. GISTEMP Team. GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP), version 4. NASA Goddard Institute for Space Studies. <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/> (2011).
-
54. Lenssen, N. J. L. et al. Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model. *J. Geophys. Res. Atmos.* **124**, 6307–6326 (2019).
-
55. O'Neill, B. C. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Glob. Environ. Chang.* **42**, 169–180 (2017).
-
56. Kriegler, E. et al. Fossil-fueled development (SSP5): an energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Glob. Environ. Chang.* **42**, 297–315 (2017).
-
57. Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N. & Schwanitz, J. Future growth patterns of world regions—a GDP scenario approach. *Glob. Environ. Chang.* **42**, 215–225 (2017).
-

59. Ha-Duong, M., Grubb, M. J. & Hourcade, J.-C. Influence of socioeconomic inertia and uncertainty on optimal CO₂-emission abatement. *Nature* **390**, 270–273 (1997).
60. Richels, R. G. & Blanford, G. J. The value of technological advance in decarbonizing the U.S. economy. *Energy Econ.* **30**, 2930–2946 (2008).
61. Hogan, W. W. & Jorgenson, D. W. Productivity trends and the cost of reducing CO₂ emissions. *Energy J.* **12**, 67–85 (1991).
62. Broome, J. The ethics of climate change. *Sci. Am.* **298**, 96–102 (2008).
63. Evans, D. J. The elasticity of marginal utility of consumption: estimates for 20 OECD countries. *Fisc. Stud.* **26**, 197–224 (2005).
64. Goulder, L. H. & Williams, R. C. The choice of discount rate for climate change policy evaluation. *Clim. Chang. Econ.* **3**, 1250024 (2012).

Acknowledgements

This research has received funding from the Horizon 2020 Framework Programme of the European Union (grant agreement no. 641811).

Author information

These authors contributed equally: Nicole Glanemann, Sven N. Willner.

Scarica PDF

Nicole Glanemann, Sven N. Willner & Anders Levermann

WHU—Otto Beisheim School of Management, 56179, Vallendar, Germany

Nicole Glanemann

Institute of Physics, Potsdam University, 14476, Potsdam, Germany

Anders Levermann

Columbia University, New York, NY, 10027, USA

Anders Levermann

Contributions

A.L. and N.G. designed the study. N.G. and S.W. developed the methods and carried out the computation. N.G., S.W., and A.L. analyzed the results and wrote the manuscript.

Corresponding author

Correspondence to [Sven N. Willner](#).

Ethics declarations

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Peer review information *Nature Communications* thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Supplementary information

[Supplementary Information](#)

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

[Reprints and permissions](#)

About this article

Cite this article

Glanemann, N., Willner, S.N. & Levermann, A. Paris Climate Agreement passes the cost-benefit test. *Nat Commun* **11**, 110 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13961-1>

Received

13 November 2019

Accepted

05 December 2019

Published

27 January 2020

DOI

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-13961-1>

Share this article

Anyone you share the following link with will be able to read this content:

[Get shareable link](#)

Scarica PDF

L'impegno economico del cambiamento climatico

Massimiliano Kotz, Anders Levermann & Leonia Wenz

Natura (2024)

L'apertura commerciale aumenta le emissioni di CO2 in Africa? Una rivalutazione utilizzando l'indice composito di Squalli e Wilson

Dieudonné Mignamissi, Eric Xavier Possi Tebeng & Arnold Dilane Momou Tchinda

Sistemi e decisioni ambientali (2024)

Nuove curve di danno e analisi multimodello suggeriscono una temperatura ottimale più bassa

Kaj-Ivar van der Wijst, Francesco Bosello ... Detlef van Vuuren

Natura Cambiamenti climatici (2023)

Comunicazioni della natura (*Nat Commun*) | ISSN 2041-1723 (online)