

Università della Valle d'Aosta - Université de la Vallée d'Aoste  
Dipartimento di Scienze Economiche e Politiche  
Economia e politiche del territorio e dell'impresa

# L'influenza del cambiamento climatico sulla produzione economica: un'analisi globale

Relatore: Claudio Brenna

Studente: 20 G01 269  
Emanuele Apollaro

---



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Analisi sull'utilizzo di dati regionali o nazionali</b>	<b>6</b>
2.1	Unità produttive su scala nazionale . . . . .	10
2.1.1	Il rapporto tra la funzione di produzione e la temperatura . . . .	10
2.1.2	Un'analisi matematica sull'impatto della temperatura sulla produzione . . . . .	15
2.1.3	Effetti sulla crescita economica . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Elaborazione dei dati</b>	<b>25</b>
3.1	Dati . . . . .	25
3.2	Approccio empirico . . . . .	29
3.3	Proiezioni climatiche . . . . .	48
3.3.1	Campionamento bootstrap . . . . .	52
3.4	Differenti modelli e ritardi sulla temperatura . . . . .	54
3.5	Funzione di danno . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Risultati</b>	<b>60</b>
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>79</b>
<b>6</b>	<b>Ringraziamenti</b>	<b>84</b>

# 1. Introduzione

—*"I cambiamenti climatici non rispettano le frontiere; non rispettano chi sei: ricco e povero, piccolo e grande. Questo è ciò che chiamiamo una sfida globale, che richiede una solidarietà globale."*<sup>1</sup>

—*"Occorre prendere coscienza che una parte del cambiamento climatico ormai è in atto e non si può più invertire. Un aumento di un paio di gradi della temperatura media dell'atmosfera terrestre entro questo secolo è quindi irreversibile, con i suoi scompensi e mutamenti che stiamo vedendo e che vedremo ancor più nei prossimi anni."*<sup>2</sup>

L'attuale cambiamento climatico è una delle sfide che definiscono il XXI secolo, insieme alla riduzione della povertà, al degrado ambientale e alla sicurezza globale. Il problema è che il cambiamento climatico non è più solo una preoccupazione potenziale ma concreta e comprende diversi ambiti come l'economia, la sociologia, la geopolitica, la politica nazionale e locale, la giustizia e la salute pubblica, solo per citarne alcune. È una delle poche evidenze scientifiche che ci fa rimettere in discussione l'intera base della società moderna. È una sfida che fa discutere i politici, mette le nazioni le une contro le altre, ci fa interrogare sulle scelte di vita individuali, e alla fine pone domande sul rapporto dell'umanità con il resto del pianeta.

L'ultimo rapporto del Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC) afferma che le prove del cambiamento climatico sono inequivocabili, con evidenze negli ultimi 100 anni di un aumento di 0,8 gradi Celsius (°C) delle temperature globali e di un aumento del livello del mare di 22 centimetri. A seconda di quanto controlliamo le future emissioni di gas serra (le cosiddette *GHG*), la temperatura media globale potrebbe aumentare tra i 2,8°C e i 5,4°C entro la fine del secolo corrente. Inoltre, il livello globale dei mari potrebbe aumentare tra i 52 e i 98 centimetri, oltre ad verificarsi cambiamenti significativi nei modelli meteorologici con eventi climatici sempre più estremi.

Questa non è la fine del mondo come previsto da molti ambientalisti alla fine degli anni '80 ma, come vedremo, potrebbe significare un enorme aumento della miseria per miliardi di persone, oltre che, naturalmente, a creare danni diretti alle popolazioni e alle nazioni.

---

<sup>1</sup>[Georgieva, 2020]

<sup>2</sup>[Arias et al., 2021]

A tal proposito, si stima che affrontare il cambiamento climatico ora costerebbe circa il 2-3% del PIL mondiale contro oltre il 20% se rimandassimo l'intervento fino alla metà del secolo<sup>3</sup>.

Prove crescenti dimostrano che le condizioni climatiche (sole, neve, o pioggia, per esempio) hanno un impatto sul funzionamento delle moderne società umane<sup>4 5</sup>, ma gli effetti sull'attività economica appaiono incoerenti. Gli elementi produttivi fondamentali delle economie moderne, come i lavoratori e più in generale le culture, mostrano risposte non lineari alla temperatura locale anche nei paesi ricchi<sup>6</sup>. Al contrario, la produttività macroeconomica aggregata di interi paesi ricchi non sembra essere influenzata dalla temperatura<sup>7</sup>, mentre i paesi poveri ne rispondono in maniera lineare<sup>8</sup>.

Da questo si possono evincere tre risultati primari. In primo luogo, temperature più elevate riducono sostanzialmente la crescita economica nei paesi poveri. In secondo luogo, temperature più elevate possono ridurre i tassi di crescita e non solo il livello di produzione. In terzo luogo, temperature più elevate hanno effetti ad ampio raggio, riducendo la produzione agricola, la produzione industriale e la stabilità politica. Risolvere queste differenze tra osservazioni che hanno una dimensione regionale (come possono essere Piemonte, Liguria ecc..) e quei dati che hanno sono rappresentativi delle nazioni (quindi, ad esempio, Germania, Italia ecc..) è fondamentale per comprendere il ruolo della ricchezza nei sistemi che hanno alla base un'interazione uomo-natura<sup>9</sup> e per anticipare l'impatto globale del cambiamento climatico<sup>1011</sup>. Qui, unificherò questi risultati, apparentemente contraddittori, tenendo conto della non linearità su scala macro (ossia considerando aree geografiche estese come i confini nazionali).

A fronte di quanto descritto, l'elaborato avrà il fine di verificare se il PIL pro capite dei diversi paesi del mondo è in qualche modo influenzato dalla temperatura, vista come insieme di fattori che caratterizzano il clima e, per completare l'analisi, cercherò di stimare l'eventuale legame emerso fino al 2100.

Per arrivare a questo risultato, nel secondo capitolo descriverò una teoria macroeconomica, che sarà alla base del modello predittivo e che avrà il compito di descrivere

---

<sup>3</sup>[Hulme and Mahony, 2010]

<sup>4</sup>[Dell et al., 2014a]

<sup>5</sup>[Hsiang et al., 2013a]

<sup>6</sup>[Schlenker and Roberts, 2009a], [Zivin and Neidell, 2010]

<sup>7</sup>[Dell et al., 2012a]

<sup>8</sup>[Dell et al., 2012a], [Hsiang, 2010a]

<sup>9</sup>[Stavins, 2019]

<sup>10</sup>[Tol, 2009]

<sup>11</sup>[Nordhaus, 2008]

come si muove la produzione di tutti i settori produttivi nel tempo e se è influenzata da fattori climatici avversi.

Successivamente, nel terzo capitolo, descriverò quelle che sono le teorie dei modelli utilizzati per lo sviluppo dell'analisi. Ed infine nell'ultimo capitolo fornirò i risultati ottenuti dai vari output.

## 2. Analisi sull'utilizzo di dati regionali o nazionali

LA produttività economica, l'efficienza con cui le società trasformano lavoro, capitale, energia e altre risorse naturali in nuovi beni o servizi, è un risultato chiave in ogni società poiché ha un impatto diretto sul benessere individuale. Sebbene sia ben noto che la temperatura influisce sulla dinamica di praticamente tutti i processi chimici, biologici ed ecologici, il modo in cui gli effetti della temperatura si ricombinano e si aggregano all'interno di società umane complesse per influenzare la produttività economica in maniera generale rimane ancora poco compreso.

La caratterizzazione di questa influenza rimane un problema fondamentale sia nel campo emergente dei sistemi binari uomo-natura che nell'economia più in generale, poiché ha implicazioni per la nostra comprensione dei modelli storici dello sviluppo umano e per come l'economia futura potrebbe rispondere ai cambiamenti climatici. Precedenti analisi<sup>1</sup> hanno individuato come specifiche componenti dell'economia legate alla produzione, come il settore primario, rispondono alla temperatura utilizzando quella che è l'alta frequenza di dati disponibili a livello regionale. Nel frattempo, le analisi a livello macro hanno documentato<sup>2</sup> forti correlazioni tra la produzione economica totale e la temperatura sia nel tempo<sup>3</sup> che nello spazio<sup>4</sup>, ma non è ancora chiaro se questi risultati sono collegati e, in caso affermativo, in quale misura.

In particolare, come vedremo nel capitolo successivo, utilizzando i dati a livello micro<sup>5</sup> (ossia utilizzando dati a livello sub-regionale e per intervalli di tempo tendenzialmente ristretti), notiamo una forte influenza della temperatura sulla produzione. Questo non è riscontrabile, ad esempio, nei paesi più avanzati, dove non ci sono chiari segni di influenza con l'utilizzo di dati a livello macro (ovvero considerando realtà tipicamente nazionali e su periodi di tempo più lunghi). Se le popolazioni ricche non sono effettivamente influenzate dalla temperatura, questo potrebbe indicare che la ricchezza e il capitale creato dall'uomo sono sostituti del capitale naturale (ad esempio, la composizione dell'atmosfera) nell'attività economica<sup>6</sup>. Risolvere questa apparente discrepanza

---

<sup>1</sup>[Graff Zivin and Neidell, 2014a][Schlenker and Roberts, 2009b]

<sup>2</sup>[Stern, 2006], [Stern and Stern, 2007], [Nordhaus, 1994]

<sup>3</sup>[Dell et al., 2012b][Dell et al., 2012b]

<sup>4</sup>[Heal and Park, 2013a][Hsiang and Jina, 2014a]

<sup>5</sup>[Dell et al., 2012b]

<sup>6</sup>[Dell et al., 2012b], [Stavins, 2019]

ha implicazioni centrali per la comprensione della natura dello sviluppo sostenibile<sup>7</sup>, che verrà affrontata nei capitoli successivi.

Numerose componenti produttive di base di un'economia mostrano una relazione fortemente non lineare con la temperatura<sup>8</sup> giornaliera o addirittura oraria. Per esempio, l'offerta di lavoro, la produttività del fattore lavoro e i rendimenti delle coltivazioni agricole diminuiscono sensibilmente oltre le soglie di temperatura comprese tra 20°C e 30°C<sup>9</sup> (Fig. 2.1 a-c).

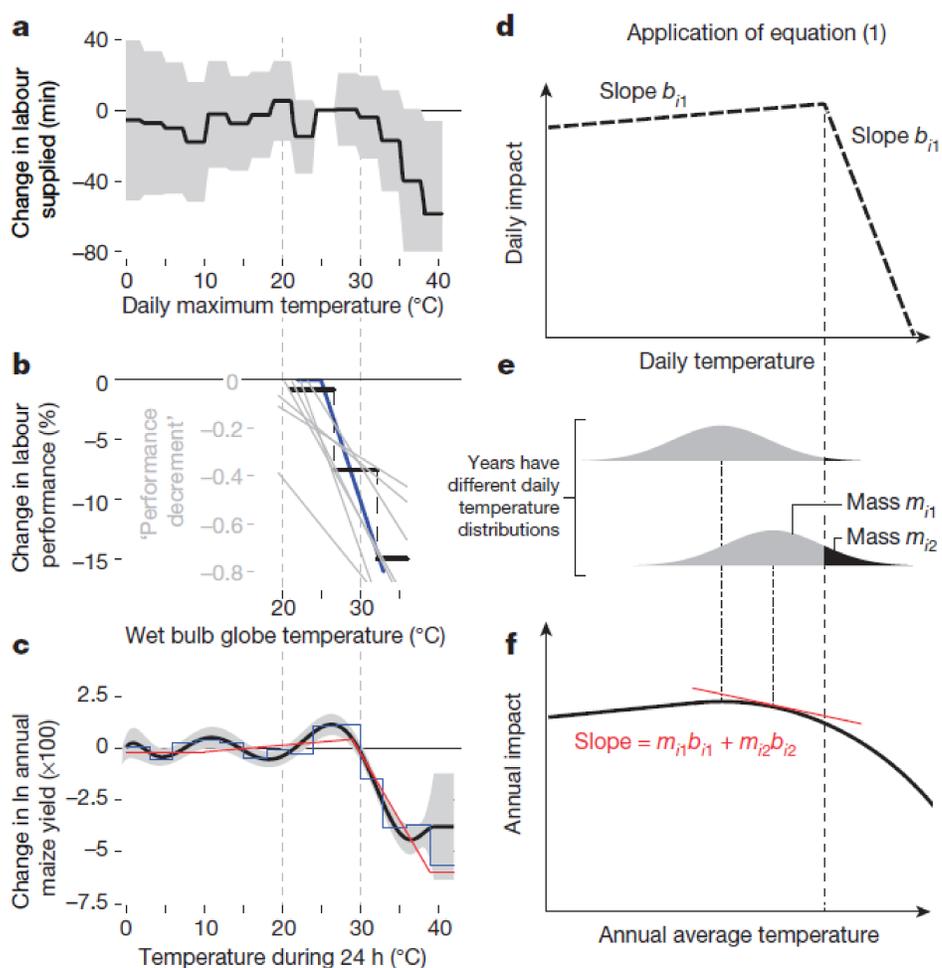


Figura 2.1: Le risposte a dati regionali altamente non lineari generano risposte nazionali che sono più uniformi. [Burke et al., 2015]

<sup>7</sup>[Chakrabarty, 2021]

<sup>8</sup>[Dell et al., 2014a]

<sup>9</sup>[Burke et al., 2015]

Tuttavia, non è chiaro se e come questi bruschi cali a livello di produzione regionale si riflettano nei dati nazionali, che sono sicuramente più grossolani o comunque massivi. Quando la produzione è integrata in grandi regioni (come, ad esempio, in Paesi o nazioni) o per lunghe unità di tempo (ad esempio, anni), esiste un'ampia distribuzione di temperature momentanee a cui sono esposte le singole componenti dell'economia (come le colture o i lavoratori). Se solo i luoghi o i periodi più caldi causano bruschi cali della produzione, allora, se combinati con molti momenti più freddi e altamente produttivi, essi ci forniscono un livello aggregato di produzione che diminuisce in maniera meno evidente quando la temperatura media aggregata aumenta.

Per capire meglio quanto descritto, si può pensare a una funzione  $f_i(T)$  che descriva il contributo produttivo di una singola unità produttiva dell'industria<sup>10</sup>  $i$  (per esempio, un'impresa) rispetto alla temperatura considerata  $T$  (per esempio, su base giornaliera) (Fig. 1d). Per un dato Paese, periodo e settore produttivo, la frazione di unità temporale trascorsa al di sotto della soglia critica di temperatura è indicata con  $m_{i1}$  mentre quella al di sopra con  $m_{i2}$  (Fig. 1e). La distribuzione completa delle unità sostanzialmente lavorate, ovviamente intese come ore, tra tutte le temperature disponibili è  $g_i(T - \bar{T})$ , ossia centrata sulla temperatura media  $\bar{T}$ . Si supponga altresì che  $g_i(\cdot)$  abbia una media pari a zero. Se la perdita di produttività all'interno di una singola ora ha un impatto limitato sulle altre unità, come suggerito da risultati precedenti elaborati da [Deryugina and Hsiang, 2014a], [Burke et al., 2014] e [Hsiang and Jina, 2015], allora la produzione aggregata  $Y$  è la somma della produzione dei vari settori, ciascuno con una produzione oraria che, per semplicità di calcolo, è stata semplificata e non specificata, per un dato Paese e periodo come riportato nella seguente formula:

$$Y(\bar{T}) = \sum_i Y_i(\bar{T}) = \sum_i \int_{-\infty}^{\infty} f_i g_i(T_i)(T - \bar{T}) dT \quad (2.1)$$

Con l'aumento di  $\bar{T}$  inteso come temperatura media di un Paese,  $m_{i2}$  aumenta gradualmente per tutte le unità produttive (Fig. 1e). Questo numero crescente di ore oltre la soglia critica di temperatura impone perdite graduali ma sempre crescenti sulla produzione totale  $Y(T)$ .

L'equazione (2.1) prevede che  $Y(\bar{T})$  generi, come si può osservare nella (Fig. 1f), una funzione concava monotona. Questa funzione prevede che  $Y(\bar{T})$  raggiunga un

---

<sup>10</sup>In questo testo, con il termine *industria* si intende sia un settore produttivo (non necessariamente appartenente al settore secondario) oppure un'impresa generica.

picco a una temperatura inferiore al valore di soglia critica in  $f_i(T)$  se la pendenza della curva è maggiore dopo la temperatura massima. Queste previsioni differiscono profondamente dall'idea che le risposte ottenibili con dati a livello macro rispecchino fedelmente le risposte riscontrabili con dati regionali, considerando che sono altamente non lineari<sup>11</sup>. A tal proposito, è importante notare che mentre le perdite di produttività aggregata dovrebbero verificarsi in concomitanza con il cambiamento di temperatura, questo cambiamento potrebbe anche influenzare la traiettoria di lungo periodo della produzione di un'economia.

Ciò potrebbe accadere, ad esempio, se le perdite temporanee e attuali alterano il tasso di investimento in nuove unità produttive, modificando così la produzione futura. In un esperimento ideale si potrebbero confrontare due Paesi identici, simulando un aumento della temperatura in uno dei due e confrontando la sua produzione economica con quella del secondo Paese. In pratica, è possibile approssimare questo esperimento anche confrontando un Paese anche con sé stesso negli anni in cui è esposto a temperature più calde o più fredde di una media di periodo a causa di cambiamenti atmosferici stocastici naturali. Da un punto di vista euristico (ossia semplificando l'idea dell'esperimento), un'economia osservata durante un anno freddo funge da situazione di base o di controllo rispetto alle osservazioni registrate durante un anno di temperature superiori alla media.

Per una corretta comparazione nello scenario appena descritto, quando nei capitoli successivi si passerà all'analisi dei dati, sarà necessario prendere in considerazione la crescita economica dei due Paesi, o del singolo Paese (considerando i periodi freddi come *status quo* e i periodi più caldi come eventi perturbatori dell'equilibrio) senza influenze soggettive. Per isolare il modo in cui la produzione economica cambia rispetto all'anno precedente - ovvero la crescita economica annuale - sarà necessario depurare i dati dai fattori secolari di ciascuna economia che si evolvono gradualmente. Questo verrà fatto utilizzando 4 principi fondamentali:

- (1) tutte le differenze costanti tra i Paesi, ad esempio la cultura o la storia;
- (2) tutti gli shock contemporanei comuni, ad esempio le variazioni dei prezzi globali o le innovazioni tecnologiche;
- (3) le tendenze quadratiche specifiche dei Paesi nei tassi di crescita, che possono derivare, ad esempio, dal cambiamento delle istituzioni politiche o delle politiche economiche;

---

<sup>11</sup>[Heal and Park, 2013b], [Hsiang, 2010b]

- e (4) gli effetti possibilmente non lineari della temperatura media annuale e delle precipitazioni.

Questo approccio è più affidabile rispetto all’aggiustamento per le sole variabili osservate, perché tiene conto di covariate non osservate, variabili nel tempo o che invece si dimostrano ripetitive nelle osservazioni (con una cadenza quasi stagionale). Questo metodo, infine, permette a queste covariate di influenzare paesi diversi in modi diversi e supera i modelli alternativi in numerose dimensioni. In sostanza, si andrà ad analizzare se le deviazioni specifiche del Paese rispetto ai trend di crescita sono correlate in modo non lineare con deviazioni specifiche del Paese rispetto all’andamento della temperatura e delle precipitazioni, dopo aver tenuto conto di eventuali shock a livello climatico e dopo aver tenuto conto di eventuali shock comuni a tutti i Paesi.

## 2.1 Unità produttive su scala nazionale

### 2.1.1 Il rapporto tra la funzione di produzione e la temperatura

**N**UMEROSI studi microeconomici<sup>12</sup> hanno identificato gli effetti di una variazione momentanea della temperatura su piccole unità di analisi, come gli effetti sulle rese agricole (a livello locale<sup>13</sup>) o gli effetti della variazione delle temperature giornaliere sulla produttività dei singoli lavoratori<sup>14</sup>. In questi casi, gli effetti della temperatura rispetto a queste dimensioni sono fortemente non lineari e questo ha portato alcuni ricercatori a suggerire che la macroeconomia dovrebbe mostrare risposte analogamente non lineari<sup>15</sup>.

Tuttavia, non è così per le unità analizzate negli studi microeconomici che sono, in termini di valori economici, molto piccoli rispetto alla scala macroeconomica. Per esempio, la produzione di un singolo lavoratore è trascurabile rispetto alla produzione di un intero Paese. Inoltre, i periodi di tempo analizzati negli studi microeconomici sono tipicamente brevi (da un’ora a un giorno nella maggior parte dei casi, raramente settimane o mesi) periodi che sono molto ridotti della scala temporale annuale o comunque di lungo periodo a cui i dati macroeconomici tipicamente fanno riferimento.

---

<sup>12</sup>[Hsiang, 2016], [Müller et al., 2011]

<sup>13</sup>[Schlenker and Roberts, 2009c], [Burke and Emerick, 2016]

<sup>14</sup>[Graff Zivin and Neidell, 2014b], [Graff Zivin et al., 2018]

<sup>15</sup>[Heal and Park, 2013a]

Qui uso un modello utilissimo per considerare come questi cambiamenti fortemente non lineari<sup>16</sup> nella produttività attraverso realtà molto piccole nell'economia e su brevi scale temporali possano aggregarsi e riflettersi nelle risposte macroeconomiche su periodi di tempo più lunghi. Si tratta quindi di passare da una realtà a livello regionale a una dimensione più vasta, si tratta di un processo simile a quello che accade con la statistica inferenziale.

Suddivido una macroeconomia (intesa come sistema nazionale) in industrie, indicando con  $i$ , con tutte le singole unità di produzione all'interno di ogni settore che si presume rispondano in modo identico alla temperatura. Ogni industria potrebbe quindi essere altamente specifica e settorizzata; per esempio, un settore potrebbe essere costituito da tutte le fattorie di mais che usano una data tecnologia per produrre una specifica varietà di mais. La produzione in ogni industria avviene in numerose piccole località in uno spazio ristretto, indicate con  $l$ ; i paesi nazionali, indicati con  $\mathcal{L}$ , sono intesi invece come superfici più ampie a cui le  $l$ -esime località appartengono. I periodi di tempo che i microstudi hanno analizzato (considerandoli, per esempio, in termini di ore) sono indicati con  $t$  mentre periodi di tempo più lunghi composti da molti momenti sequenziali (per esempio, considerando gli anni) sono indicati con  $T$ .

Seguendo la notazione di Deryugina e Hsiang<sup>17</sup> e descrivendo così i due fattori produttivi capitale  $K_i$  e lavoro  $L_i$  in ogni settore con le rispettive produttività  $A_i^K$  e  $A_i^L$ , esse sono funzioni della temperatura istantanea  $T_{lt}$  sperimentata in una determinata posizione  $l$  e nello specifico tempo  $t$ . La quantità totale di capitale e lavoro assegnata all'industria  $i$  potrebbe anche potenzialmente variare con la temperatura.

Il prezzo di un'unità di produzione è definita con  $p$  e  $\alpha$  è una costante nella funzione di produzione associata. Per una sub-unità dell'economia in una località  $l$  al tempo  $t$  usando le tecnologie descritte da  $i$ , la produzione totale  $Y_{ilt}$  è quindi data da:

$$Y_{ilt}(T_{lt}) = p_i(A_i^K(T_{lt})K_{ilt}(T_{lt}))^\alpha(A_i^L(T_{lt})L_{ilt}(T_{lt}))^{(1-\alpha)} \quad (2.2)$$

Per semplicità, assumiamo che il capitale e il lavoro non vengano riallocati rapidamen-

---

<sup>16</sup>In alcuni studi[Burke et al., 2015][Dell et al., 2014a] a livello regionale viene analizzato l'effetto di un evento atmosferico, come lo sbalzo di temperatura che è di breve durata (ad esempio giornaliero) utilizzando dati annuali. In queste situazioni, il risultato giornaliero è in realtà una risposta che ha al suo interno un evento poco duraturo, esso viene poi sviluppato, su un periodo sostanzialmente più lungo di un giorno.

<sup>17</sup>[Deryugina and Hsiang, 2014a]

te tra località in risposta alle variazioni di temperatura<sup>18</sup>. È noto che con il cambiare della temperatura<sup>19</sup>, gli individui allocano in maniera diversa l'ammontare totale del tempo assegnato alle attività lavorative<sup>20</sup>, tuttavia questa risposta può essere facilmente descritta anche da modifiche nella produttività del lavoro<sup>21</sup>  $A_i^L$ . Si noti che in un equilibrio competitivo il rapporto capitale-lavoro  $\frac{K_{ilt}}{L_{ilt}} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$  è costante con produzioni di scala lineari rispetto alla quantità totale di capitale e lavoro allocati nella  $i$ -esima industria (ovvero con rendimenti di scala costanti, osservabili nel paragrafo 2.16).

Per comodità, è possibile definire  $U_{ilt} = p_i K_{ilt}^\alpha L_{ilt}^{1-\alpha}$  come scala di misura delle risorse applicate dalla  $i$ -esima industria, localizzata nella  $l$ -esima località e al  $t$ -esimo periodo di tempo. A questo punto, possiamo pensare a  $U_i$  come al numero di unità di produzione realizzate dall'industria  $i$ . Queste ipotesi permettono di semplificare l'equazione 2.2. In questo modo, verrà sostituita la prima parte della stessa con  $f_i(T_{lt})$  a cui si aggiunge il termine  $U_{ilt}$ .

$$\begin{aligned} Y_{ilt}(T_{lt}) &= \underbrace{(A_i^K (T_{lt}^\alpha A_i^L (T_{lt}^{1-\alpha}))}_{f_i(T_{lt})} p_i K_{ilt}^\alpha L_{ilt}^{1-\alpha} \\ &= f_i(T_{lt}) U_{ilt} \end{aligned} \tag{2.3}$$

Il primo elemento,  $f_i(T_{lt})$ , è una funzione che descrive come la produttività complessiva dell'industria  $i$  risponde alle temperature istantanee, cioè che si verificano in un preciso momento. Si noti che, per semplicità, ho presupposto che l'economia sia separabile tra industrie che per località, con le imprese che si comportano come produttori atomistici<sup>22</sup>. È probabile che i cambiamenti climatici su larga scala generino impatti importanti sulle aziende, al di là di ciò che un'azienda atomistica potrebbe sperimentare in risposta ad un cambiamento isolato nella loro esposizione individuale al clima, dato che le ricadute trasversali potrebbero essere sostanziali.

---

<sup>18</sup>Questo assunto è riscontrabile dalla ricerca eseguita Negli Stati Uniti da [Deryugina and Hsiang, 2014b].

<sup>19</sup>[Graff Zivin and Neidell, 2014b], [Deryugina and Hsiang, 2014a]

<sup>20</sup>[Graff Zivin and Neidell, 2014b]

<sup>21</sup>[Graff Zivin et al., 2018]

<sup>22</sup>Gli agenti economici sono così numerosi e indipendenti, che ciascuno di essi, singolarmente, non è in grado di definire i prezzi su scala nazionale o globale, anche perché la sua merce è indistinguibile da quella dei rivali. Non esistono praticamente barriere all'entrata e il prezzo viene definito dai quantitativi di beni offerti su quel mercato in un contesto concorrenziale. I prezzi variano ogni volta che muta il rapporto tra l'offerta delle imprese e la domanda complessiva dei consumatori. Per il singolo venditore, i prezzi sono ritenuti essere costanti, nel senso che egli non ha altra scelta che accettarli senza la possibilità di cambiarli, dato che la sua singola offerta è troppo ridotta per influire su quella complessiva. [Davis, 1989]

Per esempio, le interruzioni indotte dal clima nella catena di approvvigionamento di un'azienda potrebbero amplificare l'impatto economico di un evento climatico a cui l'azienda stessa è esposta. Se questi effetti sono significativi e attraversano i confini nazionali, allora è probabile che l'approccio empirico riportato poc'anzi sottostimi l'impatto economico complessivo dei cambiamenti climatici su larga scala, poiché si concentra solo sui cambiamenti a livello nazionale senza che essi possano impattare sull'economia di altri Stati.

Per formare una misura della produzione aggregata, come il prodotto interno lordo (PIL), è necessario sommare la produzione di tutte le industrie  $i$  e sommare tale valore per tutte le località di un Paese, tenendo presente tutti i momenti (intesi in termini di tempo) all'interno del periodo di osservazione. La produzione totale nel Paese  $L$  durante l'anno  $t$  è quindi data da:

$$Y_{LT} = \sum_i Y_{i\mathcal{L}t} = \sum_i \int_{t \in \tau} \int_{l \in \mathcal{L}} f_i(T_{lt}) U_{ilt} dl dt \quad (2.4)$$

Si noti che nella formula appena riportata si fa ricorso all'utilizzo degli integrali in quanto le variabili considerate sono continue.

La distribuzione spaziale e temporale delle unità  $U_{ilt}$ , così come la distribuzione spaziale delle temperature atmosferiche determineranno a quali temperature  $T_{lt}$  sono esposte le singole unità prodotte. All'interno del Paese  $\mathcal{L}$  e nel periodo  $t$  si possono determinare il numero di punti nel tempo in cui le singole unità produttive sono esposte ad una temperatura locale momentanea  $T_{ilt}$ , al fine di costruire una funzione di distribuzione marginale<sup>23</sup> che riassume l'esposizione alla temperatura all'interno dell' $i$ -esimo settore produttivo.

La forma di questa funzione di distribuzione marginale è descritta da  $g_i(\cdot)$ , che ha media zero e che può essere spostata da un parametro che ne consente la localizzazione, ovvero  $\bar{T}_{\mathcal{L}t}$ , definito come temperatura media nel Paese  $\mathcal{L}$  durante il periodo  $t$ . In questo modo  $g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}t})$  appare come un istogramma delle temperature a cui le unità di produzione allocate all'industria  $i$   $U_i$  sono esposte in una grande regione e intervallo di tempo.

---

<sup>23</sup>Si noti che questa distribuzione marginale non è una distribuzione marginale di probabilità perché il numero totale di unità a ogni temperatura non sono normalizzate per il numero totale di unità. Cioè questa distribuzione marginale è più analoga a un istogramma che misura le frequenze piuttosto che un istogramma che misura le probabilità.

Per semplicità, qui assumiamo che  $g_i(\cdot)$  non cambi tra paesi o negli anni, anche se il parametro  $\bar{T}_{\mathcal{L}t}$  può cambiare. Nel mondo reale, la forma di  $g_i(\cdot)$  può variare in base ai cambiamenti nella distribuzione all'interno del Paese e all'interno dell'anno delle temperature a cui sono esposte le unità produttive.

Si noti che  $g_i(\cdot)$  gode di due importanti proprietà. La prima è che per una singola industria, la quantità totale o *massa* di unità produttive " $M_i$ " è data dalla somma di  $g_i(\cdot)$  su tutte le possibili temperature, per tutte le  $l$ -esime località e per ogni  $t$ -esimo periodo di tempo:

$$M_i = \int_{-\infty}^{\infty} g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) dT = \int_{t \in \tau} \int_{l \in \mathcal{L}} U_{ilt} dldt \quad (2.5)$$

La seconda proprietà conduce al fatto che la forma di  $g_i(\cdot)$  riflette la distribuzione delle unità produttive nel tempo e nello spazio tale per cui  $x \in (-\infty; \infty)$ :

$$\int_{-\infty}^x g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}t}) dT = \int_{t \in \tau} \int_{l \in \mathcal{L}} U_{ilt} 1[T_{lt} < x] dldt \quad (2.6)$$

Possiamo ora scrivere la produzione totale a livello aggregato in termini di temperatura media  $T_{lt}$  e in termini di  $g_i(\cdot)$ :

$$\begin{aligned} Y(\bar{T}_{\mathcal{L}t}) &= \sum_i Y_i(\bar{T}_{\mathcal{L}t}) \\ &= \sum_i \int_{t \in \tau} \int_{l \in \mathcal{L}} f_i(T_{lt}) U_{ilt} dldt \\ &= \sum_i \int_{-\infty}^{\infty} f_i(T) g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}T}) dT \end{aligned} \quad (2.7)$$

Da questa formula non risulta più essere necessario conoscere informazioni dettagliate sulla distribuzione nello spazio e nel tempo della variabile  $U_{ilt}$ . Come mostrato nella Figura 2.1, cambiando la temperatura media annuale  $T_{lt}$  si sposta anche la distribuzione dell'esposizione alla temperatura per le singole unità di livello regionale considerate.

## 2.1.2 Un'analisi matematica sull'impatto della temperatura sulla produzione

La Figura 2.1 mostra come l'applicazione dell'Equazione 2.1 alle funzioni di risposta osservate con dati che fanno riferimento a località limitate, precedentemente derivate, generi una risposta utilizzabile a livello nazionale. Lavori precedenti<sup>24</sup>, hanno dimostrato che le unità di base dell'economia, come le colture e la manodopera, hanno una risposta alla temperatura momentanea che è considerevolmente non lineare, che si può pensare di approssimare con una funzione lineare *piecewise* simile a quella riportata nella sezione 1D della figura 2.1.

In generale, la produttività è costante o in leggero aumento alle temperature più basse, per poi declinare bruscamente al di sopra della soglia critica  $\bar{T}$ ; queste risposte sono rappresentate nella funzione  $f_i(T)$  dell'Equazione 2.1. Quindi, per dare un'idea di come dovrebbero apparire le risposte a livello macro rispetto alle variazioni della temperatura, assumiamo che la funzione  $f_i(\cdot)$  a livello micro sia lineare e verrà analizzata con una logica *piecewise*, con un nodo (ossia un valore dopo il quale vi è una sostanziale differenza di andamento) in corrispondenza della temperatura critica  $\bar{T}$ :

$$f(T) = \begin{cases} c_1 + b_1 T & \text{se } T < \bar{T} \\ c_2 + b_2 T & \text{se } T \geq \bar{T} \end{cases} \quad (2.8)$$

dove i termini  $b_1$  e  $b_2$  indicano rispettivamente la pendenza delle due rette dell'analisi *piecewise* prima e dopo il nodo considerato e, similmente,  $c_1$  e  $c_2$  i termini di intercetta tali per cui vengono soddisfatte le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} c_1 + b_1 \bar{T} &= c_2 + b_2 \bar{T} \\ b_1 > 0, b_2 > 0, -b_2 > b_1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Queste condizioni garantiscono che  $f_i(\cdot)$  sia una funzione continua nonostante il nodo legato alla temperatura critica  $\bar{T}$  (di cui si è discusso poc'anzi), con una pendenza negativa oltre il valore di  $\bar{T}$  e che risulta avere una pendenza più ripida rispetto alla regione precedente per una data  $\bar{T}$ . La Figura 2.1 riassume queste proprietà.

---

<sup>24</sup>[Schlenker and Roberts, 2009c][Hsiang, 2010c]

Per facilitare la comparabilità tra Paesi e industrie (sempre intesi come settori produttivi) di dimensioni economiche diverse, normalizziamo la produzione totale di un'industria per la massa totale di unità prodotte  $M_i$  e ci concentriamo sul rapporto  $\frac{Y_i}{M_i}$ . Quando esaminiamo i dati, attuiamo una normalizzazione analoga concentrandoci sul PIL pro capite. Questo perché siamo interessati a come la produttività aggregata cambi con la temperatura media annua di ciascun Paese:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} \left( \frac{Y_i}{M_i} \right) &= \frac{1}{M_i} \frac{\partial Y_i}{\partial \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} = \\
&= \frac{1}{M_i} \frac{\partial}{\partial \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f_i(T) g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) dT \right] = \\
&= \frac{1}{M_i} \frac{\partial}{\partial \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} \left[ \int_{-\infty}^{\bar{T}} f_i(T) g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) dT + \int_{\bar{T}}^{\infty} f_i(T) g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) dT \right]
\end{aligned} \tag{2.10}$$

dove l'uguaglianza finale è semplicemente la separazione dell'integrale, una parte rappresenta la funzione al di sotto della temperatura critica, mentre l'altra parte indicherà la funzione al di sopra di tale livello.

A questo punto è possibile inserire una nuova variabile  $T' = T - \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}$ . Analogamente si avrà che  $\tilde{T}'$  tale per cui  $\tilde{T} = \tilde{T}' + \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}$ . Sostituendo  $T'$  e  $\tilde{T}'$  nell'equazione sopra e notando la linearità di  $f_i(\cdot)$  all'interno dell'intervallo di ciascun integrale, si ha:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} \left( \frac{Y_i}{M_i} \right) &= \frac{1}{M_i} \frac{\partial}{\partial \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} \left[ \int_{-\infty}^{\tilde{T} + \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} f_i(T' + \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) g_i(T') dT' + \int_{\tilde{T}' + \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}}^{\infty} f_i(T' + \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) g_i(T') dT' \right] \\
&= \frac{1}{M_i} \left[ \int_{-\infty}^{\tilde{T} + \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} b_1 g_i(T') dT' + \int_{\tilde{T}' + \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}}^{\infty} b_2 g_i(T') dT' \right] \\
&= b_1 m_{i1}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) + b_2 m_{i2}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau})
\end{aligned} \tag{2.11}$$

dove  $m_i(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau})$  rappresenta la frazione di unità prodotte per un periodo di tempo (ora) esposte a T inferiori a  $\tilde{T}$  per una data temperatura media nazionale  $\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}$ . In particolare,

$$m_{i1}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) = \frac{\int_{-\infty}^{\tilde{T} + \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} g_i(T') dT'}{M_i} = \frac{\int_{-\infty}^{\tilde{T}} g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) dT}{\int_{-\infty}^{\infty} g_i(T - \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) dT} \quad (2.12)$$

$$m_{i2}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) = 1 - m_{i1}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau})$$

ricordando che  $m_1$  e  $m_2$  sono rappresentate all'interno della figura 2.1.

Pertanto, la risposta aggregata  $\frac{Y_i}{M_i}$  a livello nazionale può essere calcolata integrando la media ponderata dell'Equazione 2.11 rispetto alla temperatura media annua di una precisa nazione  $\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}$ , dove i pesi  $m_{i1}$  e  $m_{i2}$  sono determinati dalla forma della distribuzione delle unità produttive  $g_i(\cdot)$  e dalla sua posizione rispetto alla temperatura critica  $\tilde{T}$ . Questa integrazione è rappresentata nella Figura 2.1(1f).

La funzione di produttività aggregata recuperata da questa integrazione sarà monotona, chiaramente solo se  $g_i(\cdot)$  è continua. Il taglio netto, osservabile nella figura, dovuto alla risposta con dati regionali della funzione  $f_i(\cdot)$  viene smussato e attenuato dalla distribuzione  $g_i(\cdot)$ . In questo modo l'effetto del riscaldamento medio complessivo (aumento di  $\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}$ ) sarà molto meno brusco sulla macroeconomia di quanto non lo sia il riscaldamento locale e istantaneo sulle unità produttive a livello regionale. Una funzione di distribuzione più ampia  $g_i(\cdot)$ , generata da una più ampia dispersione di beni prodotti nello spazio e/o in periodi di tempo più lunghi, causerà un maggiore appianamento (ovvero una riduzione di pendenza) della funzione.

Una caratteristica chiave interessante per quanto riguarda la forma di  $\frac{Y_i}{M_i}$  è la temperatura corrispondente al picco della funzione (ovvero al punto di massimo della funzione). Questo punto di svolta si verifica in quel punto in cui la derivata della temperatura è pari a zero:

$$\frac{\partial}{\partial \bar{T}_{\mathcal{L}\tau}} = b_1 m_{i1}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) + b_2 m_{i2}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}) = 0 \quad (2.13)$$

Questo implica che la temperatura nel punto di svolta  $\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}^*$  abbia la seguente proprietà:

$$\frac{m_{i2}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}^*)}{m_{i1}(\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}^*)} = \frac{b_1}{-b_2} < 1 \quad (2.14)$$

dove la disuguaglianza deriva dalle condizioni apposte nell'equazione 2.9.

Questo significa altresì che:

$$\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}^* < \tilde{T}$$

se  $g_i(\cdot)$  è approssimativamente simmetrico o decrescente<sup>25</sup>. Maggiore è la differenza tra  $|b_1|$  e  $|b_2|$ , minore è la temperatura a cui si verifica il picco. Inoltre, maggiore è la dispersione in  $g_i(\cdot)$ , più basso è il valore di  $\bar{T}_{\mathcal{L}\tau}^* < \tilde{T}$ .

Considerando più settori, la produzione totale  $\frac{Y}{M} = \sum_i \frac{Y_i}{M_i}$  sarà concava rispetto alla temperatura media annuale perché è la somma ponderata di diverse funzioni concave della temperatura media annuale.

Notiamo che il risultato ottenuto riconcilia l'annoso dibattito che interroga la questione se e quali tra i gradi giornalieri o le temperature medie stagionali siano misure migliori per misurare l'esposizione ai cambiamenti climatici<sup>26</sup>, poiché è dimostrato che entrambe sono strettamente correlate da un punto di vista matematico (e identiche sotto certe ipotesi). La risposta a livello regionale che ho osservato e che viene riportata nella letteratura<sup>27</sup> utilizza la temperatura giornaliera, ha una forma più angolata (si veda l'Equazione 2.7) rispetto alla risposta della media stagionale, che è rappresentata da un andamento più dolce e approssimativamente quadratico<sup>28</sup>. La qualità dell'adattamento chiaramente può differire tra questi due approcci a seconda dell'autocorrelazione della variabile considerata. Tuttavia, i due approcci non sono fondamentalmente diversi e possono produrre risultati simili tra loro. Rimane di facoltà del ricercatore decidere quale cadenza dei dati osservati utilizzare nelle proprie analisi.

### 2.1.3 Effetti sulla crescita economica

In questo paragrafo, analizzerò se è possibile che le perdite temporanee di produttività causate dalla temperatura possano tradursi in shock di produttività duraturi? Ovvero, la crescita economica può essere influenzata da variazioni di temperatura temporanee. Le risposte a livello regionale alla temperatura nelle analisi precedenti (discusse nel paragrafo 2.1.1) caratterizzano generalmente variazioni temporanee della produttività. Tuttavia, come discusso in dettaglio più avanti, l'analisi principale stima l'effetto non lineare della temperatura sulla crescita del PIL pro capite, in parte perché il logaritmo del PIL pro capite è noto per avere una radice unitaria<sup>29</sup> e quindi richiede una prima

---

<sup>25</sup>Questa condizione può non essere soddisfatta se  $g_i(\cdot)$  è fortemente crescente, a seconda dei valori assunti da  $b_1$  e  $b_2$ .

<sup>26</sup>[Massetti et al., 2014]

<sup>27</sup>[Schlenker and Roberts, 2009c], [Schlenker et al., 2006]

<sup>28</sup>[Massetti et al., 2014]

<sup>29</sup>All'interno del termine di errore confluiscono, anche, gli shock dovuti alle manovre di politica economica o gli effetti negativi/positivi di recessioni o di espansioni. Il possesso di una radice unitaria

differenziazione per una corretta inferenza. Come illustrerò nel prossimo capitolo, questa trasformazione della variabile dipendente non implica di per sé che la produzione sia più bassa rispetto al trend nel lungo periodo; per rispondere alla domanda precedente, è necessario esaminare l'effetto cumulativo delle variabili indipendenti ritardate, che attuo nel capitolo relativo all'analisi. I risultati sono in qualche modo ambigui per quanto riguarda la questione se l'effetto non lineare della temperatura generi una perdita permanente o temporanea della produzione rispetto al trend. In questa sezione si evidenzia come, in un modello semplice, le perdite temporanee di produttività generate da un meccanismo come l'Equazione 2.9 potrebbero generare effetti di crescita se i tassi di risparmio non cambiano con la temperatura per compensare le perdite temporanee di produttività.

Il punto di partenza nella formulazione di una qualsivoglia teoria della crescita è tendenzialmente una funzione di produzione aggregata che specifichi la relazione tra produzione aggregata e fattori produttivi che si sviluppa in questo modo:

$$Y = F(K, N) \tag{2.15}$$

dove Y, indica la produzione aggregata, K il capitale - ovvero la somma di tutti i macchinari, gli impianti, gli uffici e gli immobili dell'economia -, N è il lavoro - il numero di individui impiegati nell'economia. La funzione F, che indica quanto prodotto è ottenuto per date quantità di capitale e lavoro, è chiamata funzione di produzione aggregata. Le proprietà individuabili dagli studi<sup>30</sup> su questa relazione ci indicano che da un lato se raddoppia la scala di produzione, anche il prodotto raddoppia (rendimenti di scala costanti). Più in generale per ogni valore di x:

$$xY = F(xK, xN) \tag{2.16}$$

Dall'altra parte, dato il lavoro, aumenti di capitale generano aumenti di prodotto tanto minori quanto maggiore è il livello di capitale, assioma definito con il termine rendi-

---

ci informa che le scelte e le riforme macroeconomiche sono in grado di alterare permanentemente l'andamento della serie storica in esame. Qualora la serie non possedesse radice unitaria l'effetto al tempo t scemerebbe esponenzialmente nel tempo.

<sup>30</sup>[Montesano, 2011],[Solow, 1957]

menti decrescenti del capitale. Un'analoga proprietà vale per l'altro fattore produttivo, il lavoro: dato il capitale, aumenti della quantità di lavoro generano incrementi di prodotto tanto minori quanto maggiore è la quantità di lavoro già impiegata. Questa proprietà prende il nome di rendimenti decrescenti del lavoro. Tornando alla domanda iniziale, dobbiamo prima chiederci da che cosa è generata la crescita? Perché il prodotto per lavoratore - o il prodotto pro capite, se assumiamo che la quota di lavoratori sulla produzione totale rimanga più o meno costante nel tempo - aumenta nel corso del tempo?

Per la funzione di produzione che abbiamo visto, le proprietà appena illustrate comportano una semplice relazione tra prodotto per lavoratore e capitale per lavoratore. Ponendo  $x = \frac{1}{N}$  nell'equazione 2.16, cosicché:

$$\frac{Y}{N} = F\left(\frac{K}{N}, \frac{N}{N}\right) = F\left(\frac{K}{N}, 1\right) \quad (2.17)$$

Questa equazione fornisce una prima risposta:

Gli aumenti del prodotto per lavoratore ( $Y/N$ ) derivano da aumenti del capitale per lavoratore ( $K/N$ ). All'aumentare di  $K/N$ ,  $Y/N$  aumenta.

Gli aumenti del prodotto per lavoratore ( $Y/N$ ) possono derivare anche da miglioramenti dello stato della tecnologia, che spostano la funzione di produzione,  $F$ , e permettono di ottenere una maggior quantità di prodotto per lavoratore con lo stesso capitale.

Possiamo quindi pensare che le fonti della crescita siano costituite dall'accumulazione di capitale e dal progresso tecnologico, ovvero dal miglioramento dello stato della tecnologia.

L'accumulazione di capitale da sola, ovviamente, non può sostenere la crescita. A causa dei rendimenti decrescenti del capitale, sostenere un aumento costante del prodotto per lavoratore richiederebbe aumenti sempre maggiori del livello di capitale per lavoratore. A un certo punto, l'economia non sarà più disposta a risparmiare abbastanza per aumentare il capitale per il prodotto per lavoratore e smetterà di crescere. Ciò implica che un maggior tasso di risparmio non può sostenere in modo permanente un maggior tasso di crescita della produzione. Tuttavia, un maggior tasso di risparmio può sostenere un maggior livello di produzione.

Torniamo ora alla questione principale, dobbiamo innanzitutto definire, in che modo il tasso di risparmio influenza il livello del prodotto per lavoratore.

In un primo momento, dagli studi condotti<sup>31</sup>, sotto le ipotesi enunciate precedentemente e sulla base che il tasso di partecipazione e il tasso naturale di disoccupazione siano costanti, e che non ci sia progresso tecnologico, cosicché la funzione di produzione  $F$ , non cambi nel tempo, otteniamo la nostra relazione tra produzione e capitale per lavoratore, dal lato della produzione:

$$\frac{Y_t}{N} = f\left(\frac{K_t}{N}\right) \quad (2.18)$$

dove abbiamo introdotto gli indici temporali per la produzione e il capitale - ma non per il lavoro,  $N$ , che per ipotesi è costante e quindi non ha bisogno di alcun indice temporale.

In altre parole, un maggior capitale per lavoratore porta ad un maggior prodotto per lavoratore.

Il secondo passo consiste nel mettere in relazione l'investimento, che è una variabile, con il capitale, che è uno stock. Assumiamo che lo stock di capitale sia misurato all'inizio di ogni anno, cosicché  $K_t$  indica lo stock di capitale all'inizio dell'anno  $t$ ,  $K_{t+1}$  quello disponibile all'inizio dell'anno  $t + 1$ , e così via. Assumiamo inoltre che il capitale si deprezza a un tasso  $\delta$  annuo. E infine, che l'investimento sia proporzionale alla produzione: quanto maggiore è la produzione, tanto maggiore è il risparmio e quindi tanto più alto è l'investimento<sup>32</sup>:  $I_t = sY_t$  con  $s$  che rappresenta il risparmio.

L'andamento dello stock di capitale è quindi dato da:

$$K_{t+1} = (1 - \delta)K_t + I_t \quad (2.19)$$

Sostituendo l'investimento con la sua espressione precedente e dividendo entrambi i lati per  $N$  (il numero di occupati nell'economia), otteniamo:

$$\frac{K_{t+1}}{N} = (1 - \delta)\frac{K_t}{N} + s\frac{Y_t}{N}$$

---

<sup>31</sup>[Solow, 1957]

<sup>32</sup>[Fisher, 1969]

espandendo il termine nella parte destra dell'uguale possiamo riscrivere l'equazione come:

$$\frac{K_{t+1}}{N} - \frac{K_t}{N} = s \frac{Y_t}{N} - \delta \frac{K_t}{N} \quad (2.20)$$

la variazione dello stock di capitale per lavoratore è uguale al risparmio per lavoratore meno il deprezzamento del capitale.

Sostituendo il prodotto per lavoratore ( $Y_t/N$ ) nell'equazione 2.20 con la sua espressione in termini di capitale per lavoratore dall'equazione 2.18, otteniamo:

$$\frac{K_{t+1}}{N} - \frac{K_t}{N} = sf\left(\frac{K_t}{N}\right) - \delta \frac{K_t}{N} \quad (2.21)$$

L'analisi condotta finora ci porta ad una triplice considerazione.

Il tasso di risparmio non ha alcun effetto sul tasso di crescita del lungo periodo del prodotto per lavoratore, che è pari a zero. Tuttavia, il tasso di risparmio determina il livello del prodotto per lavoratore nel lungo periodo.

Un aumento del tasso di risparmio porterà a una crescita maggiore del capitale per lavoratore per un certo periodo di tempo, ma non per sempre. Pertanto, un aumento del tasso di risparmio non influenza il tasso di crescita del prodotto per lavoratore nel lungo periodo, che rimane uguale a zero. Un aumento del tasso di risparmio provoca un incremento del livello del prodotto per lavoratore nel lungo periodo. Ne segue che, al crescere della produzione verso il suo nuovo livello in seguito all'aumento del tasso di risparmio, l'economia attraverserà un periodo di crescita positiva, destinato comunque a finire. Inoltre, dobbiamo introdurre all'interno del modello, la temperatura 2.1.3. Sia la produttività totale liscia, doppiamente differenziabile<sup>33</sup> e concava rispetto a  $\bar{T}$ , come derivato in precedenza nei sottocapitoli 2.1.1 e 2.1.2 (senza inserire i pedici  $i\mathcal{L}\tau$ ).

Se le variazioni annuali degli stock di capitale sono modeste<sup>2.21</sup>, possiamo applicare il teorema di Taylor e linearizzare la produzione rispetto alle unità produttive totali  $K$ , con una pendenza locale  $\varphi(\bar{T})\mu$ :

---

<sup>33</sup>Funzione che può essere approssimata a meno di un resto infinitesimo da una trasformazione lineare in un intorno abbastanza piccolo di quel punto.

$$Y = \varphi(\bar{T})\mu K \quad (2.22)$$

dove  $\frac{\partial^2}{\partial T^2} < 0$ . Pertanto, la variazione temporanea della temperatura influisce sulla produzione in modo simile a una variazione della produttività totale dei fattori<sup>34</sup>. Seguendo questi lavori e le proprietà enunciate precedentemente, ipotizziamo che una frazione  $\delta$  di  $K$  si deprezzi ogni periodo e che una frazione  $s$  della produzione venga risparmiata e reinvestita per aumentare  $K$ . Derivando per  $K$ :

$$\frac{\partial K}{\partial t} = sY - \delta K$$

dove  $K$  è misurato in unità di  $U$ , che tiene conto del contributo del capitale e del lavoro alla produzione. Sostituendo all'equazione 2.22:

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial t} &= (s\varphi(\bar{T})\mu K - \delta)K \\ &= \underbrace{s\varphi(\bar{T})\mu - \delta}_{\text{crescita netta se } > 0} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Pertanto, lo stock produttivo di un Paese  $K$  crescerà se i tassi di risparmio, la temperatura media e lo stock iniziale  $K$ , consentono agli investimenti di superare il deprezzamento<sup>35</sup>. È importante notare che se la produttività si riduce in un determinato periodo a causa della temperatura, ciò ha un impatto sulla produzione nei periodi successivi perché riduce gli investimenti in  $K$ . Per rendersene conto, si noti che per un dato stock iniziale  $M_{t-1}$  appena prima di una realizzazione della temperatura  $\bar{T}_{t-1}$ , allora la produzione nel periodo successivo sarà:

$$\begin{aligned} Y_t &= \varphi(\bar{T}_t)\mu K_t \\ &= \varphi(\bar{T}_t)\mu (K_{t-1} + \Delta K_{t-1 \rightarrow t}) \\ &= \varphi(\bar{T}_t)\mu (K_{t-1} + s\varphi(\bar{T}_{t-1})\delta K_{t-1} - \delta K_{t-1}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

---

<sup>34</sup>[Nordhaus and Boyer, 2003],[Solow, 1956]

<sup>35</sup>In questa sede assumiamo che il clima non influisca sul deprezzamento, anche se recenti evidenze suggeriscono che questa potrebbe essere una direzione importante per il lavoro futuro[Moore and Diaz, 2015],[Hsiang and Jina, 2015]

Differenziando l'Equazione 2.24 rispetto alla temperatura dell'anno precedente  $\bar{T}_{t-1}$ , vediamo che la produzione attuale è influenzata dalle variazioni di temperatura dell'anno precedente

$$\frac{\partial Y_t}{\partial \bar{T}_{t-1}} = s\varphi(\bar{T}_t)\mu^2 K_{t-1} \left( \frac{\partial}{\partial \bar{T}} \Big|_{\bar{T}_{t-1}} \right) \quad (2.25)$$

perché la produzione si riduce a causa del minor reinvestimento durante un periodo precedente meno produttivo. In questo caso, il tasso di risparmio  $f$  è assunto fisso come nel modello di Solow standard, anche se un allentamento di questa ipotesi potrebbe alterare il risultato. Sebbene gli effetti possano diminuire con il tempo se il risparmio compensa le perdite di produttività,<sup>36</sup> cioè  $\frac{\partial s}{\partial Y} < 0$ , empiricamente si è riscontrato che gli individui tendono a preferire di ridurre il consumo  $(1 - f)Y$  e lasciare che i risparmi fluttuino in risposta agli shock di produttività legati al clima<sup>37</sup>, cioè è possibile che una certa quantità di risparmio compensativo si verifichi nei periodi successivi, facendo sì che la produzione torni alla fine al trend<sup>38</sup>. Se ciò si verifichi o meno è una questione empirica, che consideriamo nel capitolo successivo.

---

<sup>36</sup>Per un modello correlato di compensazione adattiva del non risparmio, si veda Dell et al (2009)[Dell et al., 2009]

<sup>37</sup>[Deaton, 1989],[Udry, 1995]

<sup>38</sup>[Barro and Sala-i Martin, 2003]

## 3. Elaborazione dei dati

### 3.1 Dati

LA nostra principale fonte di dati sul PIL pro capite è costituita dagli Indicatori di Sviluppo Mondiale della Banca Mondiale<sup>1</sup>, che coprono gli anni 1960-2020 per tutti i Paesi del mondo, anche se per alcuni Paesi sono disponibili dati solo per un sottoinsieme di anni. Per studiare gli effetti nei settori agricoli e non agricoli, utilizziamo i dati della Banca Mondiale sul valore aggiunto dei diversi settori, anch'essi disponibili per la maggior parte dei Paesi nello stesso periodo.

Per irrobustire il modello, stimo nuovamente i risultati principali con i dati sul reddito della versione 10 delle Penn World Tables<sup>2</sup>, ovvero un Database sviluppato dall'Università di Groningen, che raccoglie informazioni su 183 Paesi e che riguardano aspetti di reddito, produzione, input e produttività. Ho infatti utilizzato come principale variabile, definita nel Dataset come *rgdpCap*, una frazione del valore del Pwt100 *rgdpna* ovvero RealGDP che rappresenta il PIL reale a prezzi nazionali costanti 2017 (in milioni di dollari USA 2017) e il valore della popolazione di anno in anno (dal 1960 al 2019). La seconda misura presa in considerazione è stata calcolata sulla base della variabile *cgdpo* che rappresenta il PIL reale lato output ai PPP correnti (in milioni di dollari USA 2017), rapportato anch'esso per la popolazione. La fonte principale per i dati di temperatura e precipitazione è la ricostruzione della serie storica di queste due variabili eseguita con il progetto CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project), che è un quadro collaborativo progettato per migliorare la conoscenza dei cambiamenti climatici. È stato organizzato nel 1995 dal Working Group on Coupled Modeling (WGCM) del World Climate Research Program (WCRP). È sviluppato in fasi per favorire i miglioramenti del modello climatico, ma anche per supportare le valutazioni nazionali e internazionali dei cambiamenti climatici. Il database contiene al suo interno i dati relativi a precipitazioni (espresse in  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ , convertiti correttamente in  $\text{mm}/\text{m}^2$ ) e temperature mensili dal 1900 fino al 2100, di tutte le latitudini (da +90 a -90) e le longitudini (0 a 360) disponibili sul nostro pianeta, ho infine ponderato tali misure per la densità di popolazione nell'anno 2000 utilizzando i dati del Gridded Population of the

---

<sup>1</sup>[Information et al., 2012]

<sup>2</sup>[Zeileis, 2021][Feenstra et al., 2015a]

World<sup>3</sup>, che fornisce uno strato di popolazione spazialmente disaggregato che sia compatibile con i set di dati delle discipline sociali, economiche e delle scienze della Terra e del telerilevamento. Il set di dati completo contiene 303.657 osservazioni Paese-anno tra gli anni 1960-2020.

---

<sup>3</sup>[Doxsey-Whitfield et al., 2015]

<b>Variabile</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>Spiegazione</b>	<b>Fonte</b>
Agriculture, forestry, and fishing, value added	current US\$	Corrisponde ai dati relativi ad Agricoltura, selvicoltura e pesca. Il valore aggiunto è l'output netto di un settore dopo aver sommato tutti gli output e sottratto gli input intermedi. Viene calcolato senza effettuare detrazioni per ammortamento di beni fabbricati o esaurimento e degrado delle risorse naturali	WORLD BANK
Popolazione	N. abitanti	La popolazione totale si basa sulla definizione de facto di popolazione, che conta tutti i residenti indipendentemente dallo stato legale o dalla cittadinanza	WORLD BANK
GDP	Current US\$	Il PIL a prezzi di acquisto è la somma del valore aggiunto lordo di tutti i produttori residenti nell'economia più eventuali tasse sui prodotti e meno eventuali sussidi non inclusi nel valore dei prodotti.	WORLD BANK
GDP per capita	Current US\$	Il PIL pro capite è il prodotto interno lordo diviso per la popolazione di metà anno.	WORLD BANK
GDP per capita, PPP	Current international \$	Questo indicatore fornisce valori pro capite per il prodotto interno lordo (PIL) espresso in dollari internazionali correnti convertiti dal fattore di conversione della parità del potere d'acquisto (PPA).	WORLD BANK

<b>Variabile</b>	<b>Unità di misura</b>	<b>di Spiegazione</b>	<b>Fonte</b>
GDP growth	Annual %	Tasso di crescita percentuale annuo del PIL a prezzi di mercato basati su valuta locale costante.	WORLD BANK
GDP per capita growth	Annual %	Tasso di crescita percentuale annuo del PIL pro capite basato su valuta locale costante.	WORLD BANK
Agriculture, forestry, and fishing, value added	Annual % growth	Tasso di crescita annuale del valore aggiunto agricolo, forestale e della pesca basato su una valuta locale costante.	WORLD BANK
Real GDP cap at constant 2017 national prices	n mil. 2017US\$		PWT100
Output-side real GDP cap at current PPPs	in mil. 2017US\$		PWT100
Temperatura	°c		CMIP6
Precipitazioni	mm/m2		CMIP6

## 3.2 Approccio empirico

UTILIZZANDO un campione longitudinale di 61 anni che contiene Paesi di tutto il mondo, prendiamo le prime variazioni del logaritmo naturale del prodotto interno lordo reale annuo (corretto per l'inflazione) pro capite  $Y$ . Queste prime differenze di valori ( $Y$ ) possono essere interpretate come tassi di crescita del reddito per periodo. Decontestualizziamo i fattori che possono influenzare queste variazioni del reddito con un modello semplice e generale:

$$\Delta Y_{it} = h(T_{it}) + \lambda_1 P_{it} + \lambda_2 P_{it}^2 + \mu_i + \nu_t + \theta_i t + \theta_{i2} t^2 + \epsilon_{it} \quad (3.1)$$

dove i Paesi sono indicizzati con  $i$  e gli anni con  $t$ . Tutti i fattori variabili nel tempo che influenzano i tassi di crescita medi dei Paesi, come la storia, la cultura o la topografia, sono tenuti in considerazione dai termini costanti  $\mu_i$  specifici per Paese (ossia effetti fissi<sup>4</sup>) Questi tipi di effetti vengono calcolati autonomamente da Stata, come visibile nello script 4.1 attraverso il comando *i.year*<sup>5</sup>; questo tipo di modello è perfetto nel momento in cui, come nel mio caso, viene utilizzato su dati panel<sup>6</sup>. Gli eventi globali improvvisi, come gli shock sui mercati energetici o le recessioni globali, sono catturati dagli effetti fissi dell'anno  $\nu_t$ .

I cambiamenti gradualmente nei tassi di crescita dei singoli Paesi, che possono essere determinati da fattori che cambiano lentamente all'interno di un Paese come i cambiamenti demografici, la liberalizzazione del commercio e l'evoluzione delle istituzioni politiche, sono rappresentati dai trend temporali flessibili specifici per Paese  $\theta_i t + \theta_{i2} t^2$ . Poiché la nostra variabile dipendente è la derivata del reddito, i trend temporali quadratici specifici per Paese consentono ai tassi di crescita di evolvere in modo non lineare nel tempo, permettendoci di tenere conto dei polinomi cubici specifici per Paese nei livelli di reddito (integrando prima le differenze)<sup>7</sup>.

Si osserva, infatti, che questo tipo di polinomio approssima meglio la serie storica. Con Stata è possibile eseguire le tendenze temporali innanzitutto usando il comando

---

<sup>4</sup>Fattori che rimangono costanti tra le osservazioni in un modello di regressione.

<sup>5</sup>Effetti fissi nel tempo.

<sup>6</sup>Dati longitudinali (o *dati panel*) vengono definiti dati che prevedono l'osservazione di differenti variabili, ciascuna per una serie di periodi di tempo

<sup>7</sup>I risultati sono simili anche se includo un solo trend temporale  $\theta_i t$ , ma ho osservato che il Test F rifiuta il test nullo che i trend temporali quadratici specifici per Paese siano nulli ( $p < 0,01$ ); pertanto si mantengono i trend quadratici nel modello principale.

*gen* che ci permette di creare delle nuove variabili. È stato utilizzato nel nostro caso per creare il quadrato della temperatura, il quadrato delle precipitazioni e dividere per 1000 il dato sulle precipitazioni annuali, così da essere meglio comparabile con la crescita del PIL (espressa in percentuale) e la temperatura che assume valori decisamente più piccoli. Successivamente, per eseguire i trend temporali quadratici specifici per Paese è sufficiente introdurre il comando *yi\*y2\** che ci permette di inserire la serie, il trend, del PIL pro capite  $Y$  per ogni Paese  $i$  e duplicarlo tante volte quanti sono i Paesi oggetto di studio.

In questo quadro, ogni Paese può avere il proprio livello inteso come quantità di prodotto interno lordo o di PIL pro capite e la propria tendenza non lineare alla crescita, e l'impatto della temperatura sulla crescita è identificato dalle deviazioni da questa tendenza all'interno del Paese. Il controllo dei trend e della convergenza dei redditi<sup>8</sup> utilizzando i trend specifici di ogni Paese supera i modelli autoregressivi<sup>9</sup>.

Proprio per questa ragione, si va ad osservare quanto devia la serie storica della crescita da cambiamenti della temperatura. Questo tipo di analisi viene svolta obbligatoriamente su ogni Paese, proprio per essere più precisi rispetto ad un'autoregressione. A tal proposito, teniamo esplicitamente conto dell'effetto delle precipitazioni  $P$  e del quadrato delle precipitazioni  $P^2$  perché le variazioni idiosincratich<sup>10</sup> delle temperature annuali locali tendono a essere correlate alle variazioni delle precipitazioni<sup>11</sup>.

È importante notare che la tecnica di controllo delle influenze variabili nel tempo è più affidabile rispetto al controllo delle sole variabili osservate (ad esempio, la regressione su covariate esplicite, come le variabili demografiche o politiche), perché tiene conto in modo flessibile di quanto osservato e non osservato. Sicuramente in questo modo è più difficile osservare errori di misurazione e consente a questi controlli di influenzare in modo differenziato i diversi Paesi<sup>12</sup>.

Ad esempio, anche senza modellare esplicitamente l'effetto delle tendenze demografiche, il modello tiene conto del fatto che queste tendenze non lineari possono essere diverse nei vari Paesi, con errori di misurazione che variano da Paese a Paese, e che anche l'effetto delle tendenze demografiche sul reddito può variare da Paese a Paese. Inoltre, poiché molte delle tradizionali variabili di controllo sono a loro volta proba-

---

<sup>8</sup>[Barro and Sala-i Martin, 2003]

<sup>9</sup>[Hsiang and Jina, 2014b]

<sup>10</sup>Ovvero esogene.

<sup>11</sup>[Auffhammer et al., 2020]

<sup>12</sup>[Hsiang et al., 2013b]

bilmente influenzate dagli eventi climatici, la loro inclusione può generare distorsioni nelle nostre stime di interesse, un problema noto come "cattivo controllo"<sup>13</sup>. Questo problema è discusso in dettaglio in [Hsiang et al., 2013b].

Il mio obiettivo, dunque, è la relazione potenzialmente non lineare tra le temperature annuali  $T_{it}$  e la crescita del reddito descritta da  $h(T_{it})$ . Inizio a stimare  $h(T_{it})$  come una semplice quadratica (cioè  $h(T_{it}) = \beta_1 T_{it} + \beta_2 T_{it}^2$ ), come si può vedere da questa formula la forma utilizzata non è una lineare ma una polinomiale. Questi polinomi vengono poi raccordati tra loro, dando vita a delle forme più complesse ma più precise che vengono definite *spline* cubiche<sup>14</sup>.

Sebbene l'evidenza riscontrata a livello regionale presentata nella Figura 2.1a-c si concentri sull'effetto della temperatura sul livello della produzione, modelliamo esplicitamente l'effetto della temperatura sulla crescita perché le misure del PIL all'interno di un Paese presentano livelli di correlazione seriale molto elevati ( $p = 0,999$ ) e che dunque presentano una radice unitaria. Poiché i processi di radice unitaria non sono stazionari, le regressioni che utilizzano risultati di radice unitaria spesso generano risultati spuri e le statistiche di test tradizionali falliscono<sup>15</sup>. L'approccio standard in questo contesto è la prima differenziazione del reddito, ovvero scindere il valore assoluto dalla crescita, che in questo caso viene utilizzata come risultato<sup>16</sup>.

Dopo la prima differenziazione e la contabilizzazione degli effetti dell'anno e delle tendenze quadratiche specifiche per ogni Paese della crescita, la correlazione seriale nel risultato è molto meno problematica ( $p = 0,125$ ). Poiché una certa correlazione seriale persiste nel risultato, anche dopo la prima differenziazione, aggiustiamo in modo non parametrico le nostre stime dell'errore standard in modo da tenere conto di modelli arbitrari di autocorrelazione tra i residui all'interno di ciascun Paese<sup>17</sup>.

Il risultato è sicuramente più corretto, in quanto era evidente osservando il dato della correlazione seriale che il PIL preso come valore assoluto e non come crescita influenzava sé stesso di anno in anno; questa problematica non è stata riscontrata, invece, con grandezze quali la variazione PIL pro capite.

---

<sup>13</sup>[Angrist and Pischke, 2009]

<sup>14</sup>Una funzione spline è una funzione, costituita da un insieme di polinomi raccordati tra loro, il cui scopo è interpolare in un intervallo un insieme di punti (detti nodi della spline) in modo tale che la funzione sia continua almeno fino ad un dato ordine di derivate in ogni punto dell'intervallo.

<sup>15</sup>[Granger and Newbold, 1974]

<sup>16</sup>[Wooldridge, 2010]

<sup>17</sup>[Bertrand et al., 2004]

Se la temperatura influisce temporaneamente sulla produttività, come suggeriscono le evidenze micro presentate nella Figura 2.1*a-c*, ciò apparirà comunque come una variazione del tasso di crescita corrente, come stimato nell'Equazione 3.1. È anche possibile che la temperatura influisca sulla produttività, come suggerisce la Figura 2.1*a*.

È anche possibile che la temperatura influenzi il tasso di crescita in economie che presentano un comportamento simile alla radice unitaria, in modo tale che questi effetti alterino permanentemente le traiettorie del reddito. Ciò potrebbe verificarsi per (almeno) due importanti ragioni. In primo luogo, come discusso nella Sezione 2.1.3, gli effetti di livello in un periodo possono influenzare la produzione nel periodo successivo influenzando il tasso di crescita dello stock di capitale, un effetto che potrebbe essere amplificato se il capitale produttivo deve essere utilizzato per investire in costose misure di adattamento<sup>18</sup>.

In secondo luogo, le variazioni di temperatura potrebbero influenzare direttamente il tasso di cambiamento tecnologico (la base della crescita nei modelli standard di crescita economica), ad esempio se le temperature più calde influiscono negativamente sulla capacità cognitiva necessaria per l'innovazione<sup>19</sup>.

Se la temperatura influisce in modo permanente sul reddito attraverso gli effetti della crescita, ciò ha conseguenze maggiori per gli effetti previsti a lungo termine del cambiamento climatico, poiché piccole variazioni nei tassi di crescita annuali, cumulate su un lungo periodo, possono avere grandi effetti sul PIL totale e sugli standard di vita<sup>20</sup>.

Seguendo l'esempio di [Dell et al., 2012c], ho introdotto nell'Equazione 3.1 variabili indipendenti "ritardate"<sup>21</sup> per esaminare esplicitamente questo aspetto, trovando prove di un mix di effetti di crescita e di livello<sup>22</sup>, in linea con i lavori precedenti. In particolare, la natura qualitativa delle proiezioni climatiche medie non cambia sotto questi modelli alternativi, in gran parte perché le stime medie sono coerenti con un effetto di crescita che influisce permanentemente sul reddito. Spesso si sostiene erroneamente che l'approccio empirico dell'Equazione 3.1, utilizzando la variazione delle temperature annuali nel tempo, presupponga implicitamente che le economie non possano adattarsi.

---

<sup>18</sup>[Pindyck, 2013]

<sup>19</sup>[Graff Zivin et al., 2018][Dell et al., 2014b]

<sup>20</sup>[Moore and Diaz, 2015][Dell et al., 2014b]

<sup>21</sup>Per alcune variabili viene considerato un "ritardo" nei valori in quanto gli effetti del cambiamento climatico non hanno conseguenze immediate ma si verificano a distanza di anni.

<sup>22</sup>Intesi rispettivamente come crescita del reddito e aumento del PIL pro capite.

In un modello con effetti fissi per Paese e un termine lineare per la temperatura, tutta la variazione deriva proprio dalla variazione della temperatura all'interno del Paese nel corso del tempo (ciò che viene comunemente considerato "tempo atmosferico"<sup>23</sup>). Tuttavia, in un modello a effetti fissi con termini di temperatura di ordine superiore sia la variazione all'interno del Paese che quella tra i Paesi vengono utilizzate per identificare gli effetti della temperatura.

I Paesi con una temperatura media più elevata possono avere una risposta diversa alle variazioni di temperatura all'interno del Paese stesso. In questo modo, l'utilizzo di entrambe le fonti di variazione consente implicitamente un maggiore adattamento storico al clima di lungo periodo, anche se le variazioni di temperatura di breve periodo che influenzano la produzione rimangono impreviste. Nelle proiezioni che utilizzano queste stime, quando un determinato Paese si riscalda a una nuova temperatura media, l'effetto di un ulteriore riscaldamento può cambiare in modo tale da riflettere la risposta di altri Paesi a quella temperatura. Per una trattazione estesa di questa importante questione metodologica, si veda [McIntosh and Schlenker, 2006].

Per dimostrare più chiaramente come viene identificata la risposta non lineare globale, le Figure 4.4, ma soprattutto la 4.3, mostrano come le singole funzioni di risposta per i Paesi selezionati in diversi punti della distribuzione globale della temperatura vengono aggregate nell'analisi globale per costruire la funzione di risposta non lineare globale. La variazione all'interno dei singoli Paesi identifica la derivata locale di  $h(T_{it})$  nelle vicinanze della temperatura media di ciascun Paese. L'integrale di queste derivate stimate localmente è la nostra stima di  $h(T_{it})$ , costruita attraverso il seguente script:

dal quale ne scaturiscono le relazioni tra gli effetti marginali, qui di seguito, e la temperatura (espressa in °C).

---

<sup>23</sup>Variazione che è potenzialmente difficile da anticipare e a cui gli agenti economici possono adattarsi.

```

// Make sub-panels for Extended Data Fig 1
use C:\Users\epol\OneDrive\Desktop\DATABASEUOV0100\data\input\GrowthClimateDataset, clear
gen temp = UDel_temp_popweight
gen year2 = year*year
loc ctys ISL ITA USA VNM MLI
foreach ct of loc ctys {
cap drop growthresid tempresid
qui reg growthWDI UDel_precip_popweight UDel_precip_popweight year year2 if iso=="`ct'"
qui predict growthresid if e(sample), resid
qui reg temp UDel_precip_popweight year year2 if iso=="`ct'"
qui predict tempresid if e(sample), resid
tw (lfitci growthresid tempresid, legend(off) xtitle("temperature deviations (C)") ///
(scatter growthresid tempresid, ms(circle) mc(black) title("`ct'") saving($plots\g`ct'.gph, replace) )
}
graph combine $plots\gISL.gph $plots\gITA.gph $plots\gUSA.gph $plots\gVNM.gph $plots\gMLI.gph, rows(2) xsize(12)
ysize(10)
graph export $plots\Fig1_PanelB.pdf, as(pdf) replace
foreach ct of loc ctys {
rm $plots\g`ct'.gph
}

```

Figura 3.1: Calcolare la risposta di ogni singolo Paese (serie temporali).

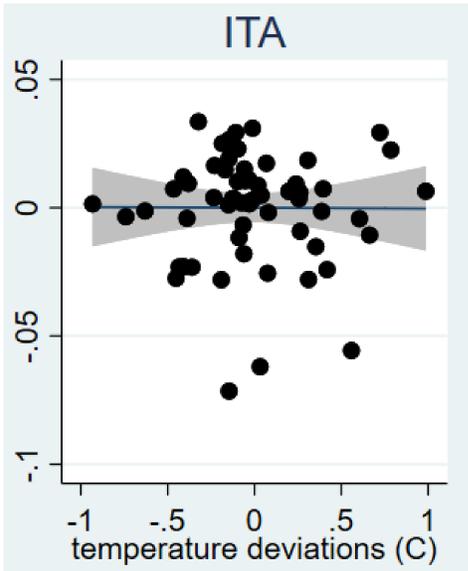


Figura 3.2: Risposta della crescita dell'Italia alla variazione della temperatura (°C).

Un'ipotesi critica di questo approccio è che esista una funzione globale  $h(\cdot)$  su cui tutti i Paesi si trovano. Per verificare questa ipotesi si esaminano i sottocampioni di dati riportati nella Figura(4.1) nel quale non si riscontrano alcune evidenze che  $h(\cdot)$  sia tanto diversa tra i vari sottocampioni.

Un altro approccio per verificare se  $h(\cdot)$  sia generalizzabile a livello globale consiste nel chiedersi se la pendenza locale descritta da un singolo Paese (come illustrato nella Figura4.5) non risulti tangente alla stima globale di  $h(\cdot)$ . Nella Figura4.5 si verifica questo aspetto stimando l'effetto marginale<sup>24</sup> locale  $\frac{\partial Y_i}{\partial T_i}$  per la serie temporale lineare di ciascun Paese (la pendenza locale). A tal fine si esegue una regressione di crescita separatamente per ogni Paese:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_i T_{it} + \lambda_i P_{it} + \theta_i t + \theta_{i2} t^2 + \epsilon_{it} \quad (3.2)$$

<sup>24</sup>Effetto di un cambiamento nel margine di una variabile economica. In altre parole, data una prima variabile dipendente da una seconda, l'effetto marginale è la variazione della prima indotta da un disturbo ridotto della seconda.

tracciando la stima  $\beta_i$  (con gli intervalli di confidenza) in funzione della temperatura media di ciascun Paese. Confrontiamo poi questi effetti marginali stimati, ai quali non imponiamo alcuna forma funzionale rispetto alla temperatura media di un Paese, con la derivata della funzione di risposta globale stimata dall'Equazione 3.1, indicata dalla linea nera. Come visibile nella Figura 3.2 in cui sostanzialmente si può osservare una risposta della crescita italiana alla temperatura che è comunque distante da quella riscontrata nel grafico della Francia.

Come era prevedibile, le stime degli effetti marginali specifici per ogni Paese, ricavate dall'Equazione 3.2, sono importanti perché ognuna utilizza meno dell'1% dei nostri dati, ma mostrano una chiara relazione, ovvero che  $h(\cdot)$  diminuisce con la temperatura (indicando una  $h(\cdot)$  non lineare e concava) e solo nel 10% dei casi (18 su 183) l'effetto marginale della risposta globale si colloca al di fuori dell'intervallo di confidenza del 95% per la  $\beta_i$  stimata di un Paese (in particolare, circa la metà dei casi in cui ciò si verifica sono grandi paesi produttori di petrolio). Ciò è pienamente coerente con l'errore di campionamento stimato e non fornisce alcuna prova contro l'ipotesi che un  $h(\cdot)$  globale descriva una risposta generalizzabile.

Un terzo e correlato approccio per capire se la risposta non lineare osservata nella 4.1a sia generalizzabile a livello globale, o se sia solo un effetto composito di una risposta negativa e lineare nei Paesi poveri e caldi e di nessuna risposta nei Paesi ricchi e freddi, è quello di permettere alla temperatura annuale, di interagire con la temperatura media e con il reddito medio del Paese. In altre parole,  $h(\cdot)$  verrebbe riformulato nel modo seguente:

$$h(T_{it}) = \beta_1 T_{it} + \beta_2 (T_{it} \cdot \bar{T}_i) + \beta_3 (T_{it} \cdot \bar{Y}_i) \quad (3.3)$$

dove  $\bar{T}_i$  e  $\bar{Y}_i$  sono, rispettivamente, la temperatura media e il logaritmo PIL medio pro capite del Paese  $i$ . In assenza del terzo termine (l'interazione con il reddito medio del Paese), una risposta non lineare e concava alla temperatura simile a quella della Figura 2a sarebbe indicata da  $\beta_1 > 0$  e  $\beta_2 < 0$ . Tuttavia, se questa risposta differenziale fosse effettivamente guidata dal reddito - e in particolare dal fatto che i Paesi poveri rispondono in modo diverso alla temperatura e che i Paesi caldi tendono a essere poveri - allora l'inclusione del termine  $\beta_3 (T_{it} \cdot \bar{Y}_i)$  dovrebbe significare che  $\beta_2 = 0$  con  $\beta_1 < 0$  e  $\beta_3 > 0$  (cioè, effetti negativi della temperatura - rappresentato nell'Equazione 3.3 dal  $\beta_2$  - a bassi livelli di reddito che si attenuano con l'aumento del reddito - ovvero il  $\beta_3$ ).

I risultati di una nuova stima della nostra specificazione principale, ma sostituendo le

```

egen mGDP = mean(gdpCAP_wdi), by(iso_id)
qui summ mGDP
g dmGDP = (mGDP - r(mean))/1000 //demean so temp coeffs are interpretable,
//and divide by 1000 to coefficients are visible
gen tempInc = temp*dmGDP
gen precInc = prec*dmGDP

areg growthWDI temp tempavg tempInc prec precavg precInc i.year _yi_* _y2_*, a(iso_id) cluster(iso_id)
est sto reg2
gen marg2=.
gen se2=.
forvalues i = 1(2)30 {
    qui lincom temp + `i'*tempavg
    replace marg2 = r(estimate) in `i'
    replace se2 = r(se) in `i'
}

//now make comparison plot
gen cihi1 = marg1 + 1.96*se1
gen cilo1 = marg1 - 1.96*se1
gen cihi2 = marg2 + 1.96*se2
gen cilo2 = marg2 - 1.96*se2
gen n1 = _n-0.2 if _n<31
gen n2 = _n+0.2 if _n<31
preserve
keep n* ci* marg*
keep in 1/30

```

Figura 3.3: **Script figura 4.5h.**

interazioni dell'Equazione 3.3 con la quadratica, sono mostrati nella Figura 4.5 e nella Tabella 3.1 (con le deviazioni delle precipitazioni che interagiscono in modo simile con le precipitazioni medie del Paese e il PIL medio pro capite del Paese). Trovo ancora una volta una forte evidenza di una risposta globale non lineare alla temperatura, con  $\beta_1 > 0$   $\beta_2 < 0$  come previsto e tutti statisticamente significativi (come mostrato nelle prime due righe della Tabella 3.1). Troviamo una forte evidenza, ovvero che questa risposta non lineare è guidata dalla temperatura media piuttosto che dalle differenze di reddito: l'introduzione dell'interazione temperatura-reddito non cambia il modo in cui la risposta alla temperatura varia con la temperatura media. I coefficienti stimati dell'interazione temperatura-reddito sono molto piccoli, il che dimostra ulteriormente che la non linearità descritta è dovuta alle differenze di temperatura media piuttosto che al reddito.

Il Grafico 4.5 mostra l'effetto marginale stimato della temperatura in diversi punti della distribuzione delle temperature medie, come stimato dalle regressioni con e senza l'interazione temperatura-reddito. In entrambi i casi, gli effetti marginali positivi a basse temperature sono negativi a temperature più elevate indicano una risposta globalmente non lineare, con stime puntuali quasi identiche sia che si includa o meno l'in-

terazione temperatura-reddito (anche se marginalmente più importanti a temperature più basse quando si include il reddito).

Il risultato principale, come vedremo nel prossimo Capitolo, è che la risposta della crescita alla temperatura è non lineare, concava e il suo ottimo è vicino a 14 °C. Per dimostrare che questo risultato è robusto dal punto di vista statistico, dal punto di vista del campione di dati, della specificazione del modello e della fonte dei dati è possibile osservare quanto riportato nella Tabella 4 eseguita attraverso lo script 5.3 riportato nell'Appendice.

La Tabella 4 fornisce le stime di regressione che fanno riferimento all'equazione 3.1 (colonna 1) e mostra come queste stime possano cambiare in base a campioni alternativi. Nella colonna 2 il campione è composto dai paesi con almeno 20 anni di dati sulla crescita (come in [Dell et al., 2012c]), nella colonna 3 si eliminano i Paesi ricchi di petrolio (definiti come i Paesi in cui almeno il 20% del PIL deriva dalla produzione di petrolio; questi paesi tendono ad essere sia ricchi che caldi) andando dunque a contrastare quanto riportato dai risultati finali. Nella colonna 4 elimino i Paesi campione Cina e Stati Uniti. L'eliminazione dei Paesi petroliferi ha un impatto limitato sulla risposta stimata del PIL totale e del PIL agricolo, ma modifica l'effetto stimato della temperatura sul PIL non agricolo in modo tale che la risposta alle alte temperature è sostanzialmente più ripida ( $\sim 40\%$ ). Ciò suggerisce che la produzione di petrolio è probabilmente meno sensibile alla temperatura rispetto ad altre componenti non agricole di queste economie.

Le colonne 4-10 della Tabella 4 dimostrano che il risultato principale è robusto nei modelli che utilizzano un insieme alternativo di controlli, rispetto al modello di riferimento. La colonna 5 sostituisce gli effetti fissi per anno con effetti fissi più flessibili per continente (per tenere conto degli shock specifici del continente in un determinato anno che potrebbero essere correlati sia con la temperatura che con la crescita, come l'ENSO<sup>25</sup>[Hsiang et al., 2011]). La colonna 6 è la stessa, ma esclude dal modello i trend specifici dei Paesi. La colonna 7 è il modello di riferimento, ma elimina completamente gli effetti fissi dell'anno. Le colonne 8-10 rappresentano il modello di riferimento più 1, 3 e 5 lag della variabile dipendente (la crescita) nel modello, come talvolta viene fatto nella letteratura macroeconomica per tenere conto di potenziali variabili omesse nel tempo, come gli investimenti in capitale parzialmente durevoli<sup>26</sup>.

---

<sup>25</sup>È un fenomeno che si osserva nell'Oceano Pacifico equatoriale, caratterizzato da oscillazioni periodiche irregolari della pressione atmosferica e della temperatura delle acque, capace di influenzare le condizioni meteorologiche di tutto il globo.

<sup>26</sup>[Romer and Romer, 2010][Cerra and Saxena, 2008]

Tabella 3.1: Stime di regressione corrispondenti all'Equazione 3.3. Tutti i modelli includono le precipitazioni e interazioni con le precipitazioni medie, gli effetti fissi del Paese, i trend temporali quadratici del Paese e gli effetti fissi dell'anno come indicato nella riga inferiore, con errori raggruppati per Paese. La temperatura è misurata in °C, con  $\bar{T}_i$  che rappresenta la temperatura media del paese  $i$ . Le colonne 2-3 includono la temperatura e le precipitazioni interagite con il PIL medio pro capite del paese nel periodo di studio ( $\bar{Y}_i$ ) e la colonna 4 la temperatura e le precipitazioni interagite con il PIL medio pro capite del paese espresse in log. In entrambi i casi si è sottratta la media dalla misura del reddito in modo che gli effetti della temperatura nelle prime due righe della tabella possano essere interpretati come effetti valutati anche come effetti sul reddito globale. La colonna 3 è identica alla colonna 2 ma sostituisce gli effetti fissi per continente e anno con gli effetti fissi per anno. Gli effetti marginali riportati nel grafico 4.5 corrispondono alle stime dei coefficienti nelle prime due righe delle colonne 1 e 2. Gli asterischi indicano significatività statistica ai livelli dell'1%(\*\*\*) , 5%(\*\*) e 10%(\*).

	(1)	(2)	(3)	(4)
$T_{it}$	0.0072** (0.0030)	0.0059* (0.0035)	0.0052* (0.0030)	0.0054 (0.0044)
$T_{it} * \bar{T}_i$	-0.0006*** (0.0002)	-0.0005** (0.0002)	-0.0005** (0.0002)	-0.0005* (0.0003)
$T_{it} * \bar{Y}_i$		0.0001 (0.0002)	0.0002 (0.0001)	
$T_{it} * \log(\bar{Y}_i)$				0.0011 (0.0015)
Observations	8199	8199	8199	8199
R squared	0.287	0.287	0.350	0.287

La colonna 11 stima il nostro modello di riferimento utilizzando i dati di crescita delle Penn World Tables<sup>27</sup> invece degli Indicatori di Sviluppo Mondiale della Banca Mondiale. In tutti i casi, i coefficienti stimati cambiano poco, rimanendo coerenti per dimensione e segno, e sono altamente significativi dal punto di vista statistico in tutte le specifiche. La temperatura ottimale stimata (riga in basso) varia leggermente di più perché è una combinazione non lineare di due parametri incerti ( $\frac{-\beta_1}{2\beta_2}$ ); tuttavia, rimane sempre ben al di sotto della fascia di 20-30 gradi, come previsto dalla Figura 2.1. In generale, stime più basse per l'ottimo generano maggiori perdite previste dal cambiamento climatico, perché un ottimo più basso indica che i Paesi più ricchi e più freddi sono più negativamente influenzati dal riscaldamento. Come quantificato di seguito, questo suggerisce che le stime dei danni utilizzando il nostro modello di base sono, se non altro, conservative.

L'effetto della temperatura sulla crescita viene modellato utilizzando un polinomio quadratico nella temperatura (cioè, nell'Equazione 3.1,  $h(T) = \beta_1 T_{it} + \beta_2 T_{it}^2$ ). La utilizziamo come benchmark perché è la forma più conservativa che descrive accuratamente il modello dominante nei dati. Ho osservato però che a volte, alcuni ricercatori, preferiscono le spline cubiche ristrette<sup>28</sup> per le loro proprietà statistiche<sup>29</sup>, ma questi modelli non hanno prestazioni migliori in questo contesto.

La figura 4.7 utilizza una varietà di forme funzionali sempre più flessibili per stimare la relazione tra temperatura e crescita, utilizzando o polinomi di ordine superiore (fino al settimo ordine) o spline cubiche ristrette (fino a 7 nodi)<sup>30</sup>. Le forme funzionali più flessibili danno funzioni di risposta estremamente simili alla nostra stima principale.

Verifichiamo se la temperatura influisce sulla crescita o sul livello<sup>31</sup> del PIL pro capite. Come discusso in precedenza, la differenza ha importanti implicazioni per la dinamica dei futuri cambiamenti climatici, in quanto una data dimensione dell'effetto nei livelli avrà un effetto molto più piccolo sull'evoluzione del PIL in un lungo periodo rispetto alla stessa dimensione dell'effetto sulla crescita<sup>32</sup>. Per testare gli effetti di crescita rispetto a quelli di livello, seguo il riferimento tratto da [Dell et al., 2012c] e da [Burke et al., 2015]

---

<sup>27</sup>[Summers and Heston, 1991]

<sup>28</sup>Le spline cubiche limitate sono un modo per verificare l'ipotesi che la relazione non sia lineare. Le spline cubiche limitate sono solo una trasformazione di una variabile indipendente.

<sup>29</sup>[Schlenker and Roberts, 2009c]

<sup>30</sup>I nodi sono il punto in cui vengono uniti diversi polinomi cubici. Le spline cubiche, in questi nodi impongono che ci siano tre requisiti di continuità (la funzione, la sua pendenza e la sua accelerazione o derivata seconda (pendenza della pendenza))

<sup>31</sup>Inteso come quantità, PIL pro capite assunto come valore assoluto.

<sup>32</sup>[Moore and Diaz, 2015], [Dell et al., 2012c]

e stimo un modello di ritardo distribuito per poi sommare i vari effetti negli anni. Se la temperatura influisce sul livello della produzione ma non il suo tasso di crescita, allora gli effetti contemporanei e ritardati della temperatura dovrebbero avere segni opposti: l'effetto negativo di un anno caldo sulla produzione di quell'anno sarebbe seguito da un effetto positivo l'anno successivo, quando l'economia si riprende (Figura 4.3a-b).

Tuttavia, se le temperature più calde della media influiscono sul tasso di crescita della produzione, allora gli effetti ritardati dovrebbero essere pari a zero o potrebbero avere lo stesso segno se gli effetti persistono. La somma degli effetti tra gli anni consente quindi di effettuare un test diretto degli effetti di crescita rispetto a quelli di livello. Se la somma degli effetti contemporanei e di quelli ritardati si riduce a zero con l'aggiunta di ulteriori ritardi, ciò indica principalmente effetti di livello; se gli effetti sommati sono indistinguibili dall'effetto contemporaneo (o più grandi in termini di grandezza assoluta), ciò suggerisce effetti di crescita; qualcosa di intermedio suggerirebbe una combinazione di effetti di crescita e di livello.

È importante notare che un risultato di soli effetti di livello potrebbe comunque implicare un sostanziale impatto negativo del cambiamento climatico.

Come mostrato dalle linee nere nella Figura 4.3a-b, un effetto di livello di un anno caldo sulla produzione storica significa che la produzione torna al trend dopo l'anno caldo, ma la perdita di produzione registrata nell'anno caldo non viene mai recuperata. Se ciò che accade in un anno caldo storico è predittivo di ciò che accadrà con il riscaldamento delle temperature future, allora anche il riscaldamento futuro porterà a perdite di produzione che non verranno recuperate - e queste perdite aumenteranno nel tempo con il riscaldamento delle temperature.

Ciononostante, resta il fatto che un determinato livello di influenza avrà un effetto sul PIL di lungo periodo molto più ridotto rispetto a un effetto di pari entità sul tasso di crescita: un aumento dell'1% della temperatura (°C) sul livello di produzione significherà che un aumento istantaneo della temperatura di 1 °C abbasserà la produzione dell'1% dopo 100 anni, mentre un aumento dell'1% della temperatura (°C) sul tasso di crescita della produzione implica che un aumento istantaneo di 1 °C abbasserà la produzione di circa il 62% dopo 100 anni.

Poiché stiamo stimando modelli non lineari, calcoliamo gli effetti marginali sia per la funzione di risposta contemporanea che per quella ritardata in ogni punto del supporto della temperatura e sommiamo questi effetti marginali nel tempo<sup>33</sup>. Il risultato di questa

---

<sup>33</sup>In un solo modello con un solo ritardo (e ignorando i controlli)  $Y_{it} = \beta_1 T_{it} + \beta_2 T_{it}^2 + \beta_3 T_{it} + \beta_4 T_{it-1}^2$

procedura è una stima dell'effetto cumulativo sul reddito di un grado di riscaldamento, in funzione della temperatura iniziale di un Paese.

La Figura 4.6*a-b* mostra questi risultati per modelli con un massimo di 5 lag annuali e la Tabella 3.2 fornisce le stime corrispondenti in forma di tabella. Sostanzialmente viene rappresentato un effetto molto più importante di un qualsiasi shock assunto nell'anno  $t+1$  se il dato preso in considerazione è la crescita di un valore assoluto, come nel caso di Variazione del PIL pro capite e PIL pro capite.

Sebbene i risultati diventino più importanti con l'aggiunta di un numero crescente di lag, le stime puntuali indicano effetti di crescita all'estremità calda della distribuzione delle temperature. All'estremità fredda, gli effetti cumulativi medi invertono il segno, cosicché dopo aver tenuto conto di 3 lag, stimiamo che anche i redditi dei Paesi freddi siano negativamente influenzati dal riscaldamento (con una sostanziale incertezza in questa stima). Ciò suggerisce che quando si tiene conto degli effetti dinamici della temperatura nel tempo, i Paesi più caldi rimangono in uno stato peggiore con un ulteriore riscaldamento e i Paesi più freddi potrebbero non trarre alcun beneficio netto. Per i Paesi più freddi dunque potrebbe esistere una sostanziale speranza di crescita anche in condizione di aumento della temperatura.

È importante notare, tuttavia, che, come previsto, con l'inclusione di più lag, l'incertezza nell'effetto cumulativo aumenta, perché stiamo aggiungendo ulteriori parametri incerti. Ciò rende sempre più difficile respingere l'ipotesi dell'effetto di livello o di crescita. Così, mentre possiamo dimostrare chiaramente che esiste un effetto non lineare della temperatura sulla produzione economica, non possiamo rifiutare l'ipotesi che questo effetto sia un vero effetto di crescita, né possiamo rifiutare l'ipotesi che sia un effetto temporaneo di livello.

Per tenere conto di questa incertezza nelle nostre proiezioni (di seguito), presentiamo i risultati da cui attingiamo all'intera distribuzione delle stime incerte dei parametri (in breve, ricampionando dagli intervalli di confidenza nella Figura 4.6*a-b*), utilizzando sia modelli con zero lag (modelli "short run") sia modelli con cinque lag (modelli "long run"). Come mostriamo di seguito, l'aggiunta di un numero crescente di lag tende a rendere gli impatti dei futuri aumenti di temperatura previsti sostanzialmente più incerti e più negativi, perché gli effetti cumulativi marginali diventano negativi per i Paesi freddi una volta incluso un numero maggiore di lag. Questo risultato è in linea

---

e l'effetto marginale complessivo sulla crescita ad una certa temperatura  $T^*$  è quindi  $\hat{\beta}_1 + 2\hat{\beta}_2(T^*) + \hat{\beta}_3 + 2\hat{\beta}_4(T^*)$

Tabella 3.2: Effetto marginale della temperatura sulla crescita in diversi punti della distribuzione della temperatura, basato su modelli di regressione che includono tra zero e 5 lag della temperatura. Per i modelli con almeno un ritardo, la stima riportata è la somma degli effetti contemporanei e ritardati, valutati alla temperatura indicata. I numeri tra parentesi indicano l'errore standard di ogni stima. Le stime corrispondono a quelle mostrate visivamente nella Figura 4.6C.

	Lags = 0	Lags = 1	Lags = 3	Lags = 5
5 °C	0.0071 (0.0024)	0.0050 (0.0034)	0.0003 (0.0042)	-0.0043 (0.0043)
10 °C	0.0030 (0.0017)	0.0022 (0.0024)	-0.0023 (0.0031)	-0.0068 (0.0033)
15 °C	-0.0010 (0.0015)	-0.0007 (0.0019)	-0.0048 (0.0026)	-0.0093 (0.0033)
20 °C	-0.0051 (0.0020)	-0.0035 (0.0024)	-0.0074 (0.0031)	-0.0118 (0.0043)
25 °C	-0.0092 (0.0029)	-0.0064 (0.0035)	-0.0099 (0.0043)	-0.0143 (0.0057)
30 °C	-0.0132 (0.0039)	-0.0092 (0.0047)	-0.0124 (0.0057)	-0.0168 (0.0074)

con i risultati di [Dell et al., 2012c], nel quale si evince che le stime puntuali degli effetti della temperatura sulla crescita sono positive per i Paesi ricchi nel modello a zero lag, ma diventano negative quando si aggiunge un numero crescente di lag della temperatura.

La figura 4.4 mappa l'effetto marginale del riscaldamento di +1 °C, cioè l'impatto previsto sul tasso di crescita di +1 °C, stimato con l'Equazione 3.1. Le dimensioni dell'effetto sono grandi sia per i Paesi tropicali caldi che per quelli più freddi ad alta latitudine, lontani dalla temperatura ottimale. Ad esempio, si prevede che un riscaldamento aggiuntivo di +1 aumenti i tassi di crescita di >0,5 punti percentuali in alcune parti dell'Europa settentrionale e diminuisca la crescita di >1 punto percentuale in gran parte dei tropici. Un'incidenza di -1 punto percentuale significa che un Paese che cresce del 2% all'anno in un anno di temperatura normale crescerebbe dell'1% all'anno se la temperatura fosse di +1 C più calda. I Paesi tropicali presentano l'effetto marginale maggiore in base alla nostra risposta aggregata, ma sono anche più poveri in media.

Come discusso in precedenza, questo rende meno chiaro se sia la povertà o il caldo a far aumentare l'effetto della temperatura in questi Paesi. Se i Paesi tropicali hanno un effetto marginale della temperatura maggiore perché sono poveri, piuttosto che perché sono caldi, allora il nostro modello non lineare aggregato è probabilmente mal pensato. Il lavoro pionieristico di [Dell et al., (2012)] ha suggerito che la povertà è la dimensione critica dei Paesi che determina l'effetto della temperatura sul reddito. Pertanto, seguo [Dell et al., (2012)] ed esamino se essere ricchi o poveri altera la relazione non lineare tra temperatura e crescita, utilizzando gli stessi criteri per distinguere ricchi e poveri. Nel Capitolo successivo, riconcilierò i risultati con quelli ottenuti dalla ricerca di [Burke et al., 2015].

Per verificare la reattività differenziale tra Paesi ricchi e poveri e tra i diversi settori dell'economia nei dati, faccio interagire le variabili di temperatura e precipitazione nell'Equazione 3.1 con un indicatore che indica se il reddito pro capite aggiustato per la parità di potere d'acquisto (PPP) di un Paese era inferiore alla mediana globale nel 1980 (il primo anno in cui sono disponibili dati PPP per la maggior parte del nostro campione; i redditi PPP aggiustano per le differenze di prezzo tra i Paesi e sono importanti per confrontare correttamente i livelli di reddito tra i Paesi). Cioè, con  $D_i = 1$  per un paese con un reddito pro capite PPP inferiore alla media nel 1980 (e zero altrimenti), la funzione  $h(T_{it})$  nell'Equazione 3.1 diventa:

$$h(T_{it}) = \beta_1 T_{it} + \beta_2 T_{it}^2 + \beta_3 (T_{it} \cdot D_i) + \beta_4 (T_{it}^2 \cdot D_i) \quad (3.4)$$

con  $\beta_1$  e  $\beta_2$  che descrivono la funzione di risposta per i Paesi ricchi e  $\beta_3$  e  $\beta_4$  che descrivono gli aggiustamenti di questi parametri applicabili solo ai Paesi poveri. Se le risposte dei Paesi ricchi e di quelli poveri hanno una struttura diversa, gli aggiustamenti  $\beta_3$  e/o  $\beta_4$  saranno significativamente diversi da zero. Se questi aggiustamenti non sono distinguibili da zero, ciò indica che i dati non possono respingere l'ipotesi che la risposta stimata per i Paesi ricchi e poveri sia la stessa.

La Tabella 4.2 fornisce i risultati della regressione quando l'Equazione 3.4 viene sostituita all'Equazione 3.1. La colonna 1 fornisce il modello di riferimento. Troviamo che gli effetti lineari e quadratici della temperatura sui Paesi ricchi ( $\beta_1, \beta_2$ ) sono significativamente diversi da zero e che gli aggiustamenti a questi parametri per i Paesi poveri ( $\beta_3, \beta_4$ ) non sono significativi. Nelle colonne 2-6 modifichiamo il nostro modello di riferimento cambiando la struttura dei controlli non parametrici (come nella Tabella 4.1).

I risultati sono sostanzialmente simili se gli effetti fissi dell'anno possono o meno variare tra paesi ricchi e paesi poveri<sup>34</sup> (colonna 2), se il campione è ristretto o meno ai paesi con almeno 20 osservazioni (colonne 3-4) e se gli effetti fissi continente-anno sono inclusi in aggiunta (colonna 5) o al posto dei trend temporali dei paesi (colonna 6).

In tutti i casi le funzioni di risposta sia nei Paesi ricchi che in quelli poveri sono concave e in nessun caso i termini di interazione sono significativi, il che suggerisce che non possiamo mai rifiutare che i Paesi ricchi e quelli poveri abbiano la stessa funzione di risposta alla temperatura. Nelle colonne 2 e 4, l'incertezza statistica aumenta in modo tale che i parametri stimati per i Paesi ricchi non sono più significativi, ma le stime puntuali in questi modelli rimangono praticamente invariate e le stime risultanti non rifiutano il modello di riferimento.<sup>35</sup> Notiamo che la specificazione dei controlli temporali preferita da [Dell et al., (2012)] è la stessa del modello nella colonna 6, il che suggerisce che l'effetto non lineare della temperatura sui Paesi ricchi è altamente significativo dal punto di vista statistico e non è significativamente differente dall'effetto nei Paesi poveri.

Una domanda diversa ma correlata ci impone di osservare se la pendenza della funzione di risposta  $h(T)$  sia essa stessa statisticamente diversa da zero a temperature diverse. Testare gli effetti marginali a temperature diverse è diverso dal testare le stime significative dei parametri (ad esempio,  $\beta_1$  e  $\beta_2$ ) perché il nostro modello è non lineare, quindi la derivata della funzione di risposta  $h(T)$  è statisticamente diversa da zero a temperature diverse, per cui la derivata di  $h(T)$  è essa stessa una funzione della temperatura e quindi deve essere valutata a specifiche temperature per avere un significato. Nel nostro modello di benchmark polarizzato (Figura 4.1a) la derivata di  $h(T)$  è chiaramente differente da zero in quasi tutti i punti, tranne che in prossimità dell'optimum, dove la derivata è vicina a zero.

La derivata stimata di questa funzione è visualizzata nel pannello "0 lag" di pannello della Figura 4.1c. A basse temperature, il riscaldamento ha effetti positivi sulla produzione, mentre ad alte temperature, il riscaldamento ha evidenti effetti negativi.

Quando i dati vengono suddivisi in sottocampioni (ad esempio, ricchi e poveri), l'in-

---

<sup>34</sup>Ad esempio, dividendo il campione ed eseguendo regressioni panel separate con effetti fissi all'anno sia per i Paesi ricchi che per i Paesi poveri, si permette implicitamente agli effetti fissi all'anno di variare tra i vari raggruppamenti di Paesi. Il modello aggregato che interagisce con le variabili climatiche con un indicatore che indica se un Paese è povero assume implicitamente effetti dell'anno comuni a tutti i Paesi, a meno che questi effetti fissi dell'anno non influenzino anche con l'indicatore di Paese povero. La tabella mostra che i risultati sono simili in entrambi i casi.

<sup>35</sup>[Hsiang and Meng, 2014]

certezza statistica aumenta e quindi la funzione  $h(T)$  stimata presenta intervalli di confidenza più ampi, come nella Figura 4.1*b* del Capitolo successivo. In questi sottocampioni, continuiamo a trovare che le strutture nella risposta (come il parametro  $\beta_2$  che descrive la curvatura) sono statisticamente significative anche se la funzione  $h(T)$  non si separa sempre da zero nell'intervallo dei dati. In questi casi, è interessante anche verificare se la pendenza di  $h(T)$  è significativa a temperature diverse per specifici sottocampioni. È importante notare che tale significatività non è critica per il nostro risultato principale relativo alla struttura non lineare di  $h(\cdot)$ : per una risposta quadratica ci devono essere regioni di  $h(\cdot)$  in cui la pendenza è zero e, con qualsiasi incertezza, è probabile che ci sia un'ampia gamma di temperature con pendenze prossime allo zero. Tuttavia, comprendere l'incertezza degli effetti marginali è utile per capire in che misura i Paesi ricchi e quelli poveri rispondono in modo simile alla temperatura a temperature specifiche, e le nostre proiezioni d'impatto incorporano queste incertezze.

La Figura 4.7 mostra gli effetti marginali stimati della temperatura per la crescita totale (pannelli *d-e*), la crescita agricola (*g-h*) e la crescita non agricola (*j-k*) sia per i Paesi ricchi che per quelli poveri (si tratta delle derivate delle funzioni nelle Figure 4.1*b*, *d*, e *e*). Per quanto riguarda la crescita totale, l'effetto marginale sui Paesi ricchi alle basse temperature è significativamente positivo, mentre è significativamente negativo per i Paesi poveri alle temperature calde. Un modello simile vale per la crescita agricola e non agricola, con l'eccezione della crescita non agricola nei paesi ricchi.

Un modello simile vale per la crescita agricola e non agricola, con l'eccezione della crescita non agricola nei paesi ricchi, dove le alte temperature hanno un effetto leggermente più negativo rispetto alle basse temperature. La struttura di queste incertezze riflette principalmente la distribuzione dei paesi ricchi e poveri: poiché ci sono molti paesi ricchi a temperature fredde e molti paesi poveri a temperature calde, la struttura di  $h(\cdot)$  è stimata con maggior precisione in quelle rispettive regioni.

La Figura 4.7 *i* e *l* verifica poi le differenze tra Paesi ricchi e poveri nella pendenza delle loro funzioni di risposta in ogni punto della distribuzione della temperatura per il nostro campione principale e il nostro approccio di stima, corrispondente alla Figura 4.1. Mentre le stime puntuali suggeriscono che i Paesi più ricchi hanno una funzione di risposta leggermente più piatta per il PIL complessivo e per il PIL non agricolo, e una funzione di risposta leggermente più ripida per il PIL agricolo a temperature più elevate (quest'ultimo dato è coerente con la scoperta che i sistemi agricoli meno limitati

dal punto di vista dei nutrienti sono in realtà più sensibili ai cambiamenti climatici<sup>36</sup>), in nessun punto della distribuzione delle temperature possiamo respingere l'ipotesi che i Paesi ricchi e quelli poveri abbiano la stessa funzione di risposta per uno qualsiasi di questi tre risultati.

L'analisi di cui sopra non trova alcuna prova che i Paesi ricchi e quelli poveri rispondano in modo diverso alla temperatura, sebbene trovi anche molte temperature per le quali l'effetto marginale della temperatura non è statisticamente significativo in un sottocampione specifico.

L'interpretazione di questi fatti richiede attenzione, soprattutto quando si utilizzano test di ipotesi a coppie. Un errore comune è quello di liquidare come irrilevante per un sottocampione un risultato ottenuto utilizzando dati aggregati, se una stima identica che utilizza solo il sottocampione non è significativa di per sé. Questa logica è chiaramente errata perché per qualsiasi campione di dati, un risultato reale sarà reso insignificante se il campione è diciamo troppo ridotto attraverso il sottocampionamento. Nel nostro caso, non possiamo sapere con certezza se i Paesi ricchi e quelli poveri debbano essere raggruppati o meno perché non possiamo osservare il vero processo di generazione dei dati e verificare che sia effettivamente lo stesso per i Paesi ricchi e quelli poveri a tal proposito rimando allo Script 5.1. Come già detto, non possiamo rifiutare l'ipotesi che ricchi e poveri rispondano in modo identico, ma non possiamo nemmeno rifiutare l'ipotesi che l'effetto marginale della temperatura sia pari a zero per molti valori di temperatura in entrambi i sottocampioni, sia dei Paesi ricchi che di quelli poveri. Questo è particolarmente rilevante per le stime globali degli impatti del cambiamento climatico, dove gli effetti delle temperature elevate sui Paesi ricchi sono particolarmente influenti.

Ci chiediamo quindi se sia più probabile che (A) i Paesi ricchi (nel loro sottocampione ridotto) abbiano un effetto discendente alle alte temperature (simile a quello dei Paesi poveri) o (B) i Paesi ricchi e poveri abbiano risposte diverse alle alte temperature. Per considerare questo aspetto, nella Figura 4.7*i-u* riportiamo i valori di  $p$  per gli effetti marginali della temperatura mostrati nei pannelli d-m. Questi valori  $p$  rappresentano una stima della probabilità di recuperare un effetto marginale stimato precedentemente. Per tutte e tre le misure di produzione, è più probabile che (A) i Paesi ricchi abbiano effetti marginali negativi alle alte temperature (i valori di  $p$  sono più piccoli) che (B) i Paesi ricchi abbiano un effetto marginale diverso da quello dei Paesi poveri alle alte temperature.

---

<sup>36</sup>[Schlenker and Lobell, 2010]

Tuttavia, poiché non possiamo escludere che i Paesi ricchi e quelli poveri rispondano in modo diverso, o che i Paesi ricchi non rispondano affatto, riportiamo le proiezioni di impatto che tengono conto dell'intera gamma di possibili risposte sia per i Paesi ricchi che per quelli poveri. Per riassumere i nostri vari risultati sulla potenziale eterogeneità:

- Assumendo che un singolo  $h(\cdot)$  descriva gli effetti per tutti i Paesi, troviamo una non linearità altamente significativa nella risposta alla temperatura;
- Considerando i soli Paesi ricchi, troviamo una significativa non linearità nella risposta alla temperatura;
- Considerando i soli Paesi poveri, troviamo una significativa non linearità nella risposta alla temperatura;
- Non riusciamo a respingere l'ipotesi che la non linearità nella risposta dei Paesi ricchi (considerati da soli) rispecchia la stima aggregata;
- Non riusciamo a respingere l'ipotesi che la non linearità nella risposta dei Paesi poveri (considerati da soli) rispecchi la stima aggregata;
- Non riusciamo a respingere l'ipotesi che la non linearità nella risposta dei Paesi ricchi (considerati da soli) rispecchi la non linearità nella risposta dei Paesi poveri;
- Assumendo che un singolo  $h(\cdot)$  descriva gli effetti per tutti i Paesi, troviamo effetti marginali altamente significativi della temperatura a quasi tutte le temperature;
- Non riusciamo a respingere l'ipotesi che l'effetto marginale della temperatura per i Paesi ricchi (considerati da soli) rispecchi la stima aggregata;
- Non riusciamo a rifiutare l'ipotesi che l'effetto marginale della temperatura per i Paesi poveri (considerati da soli) rispecchi la stima aggregata;
- Non riusciamo a rifiutare l'ipotesi che l'effetto marginale della temperatura per i Paesi ricchi (considerati da soli) rispecchi l'effetto marginale della temperatura per i Paesi poveri (considerati da soli);
- Troviamo effetti marginali delle temperature fredde altamente significativi per i Paesi ricchi (considerati da soli) e marginalmente significativi per i Paesi poveri (considerati da soli);

- Troviamo effetti marginali altamente significativi delle temperature calde per i Paesi poveri (considerati da soli);
- Non riusciamo a respingere, a livelli di confidenza convenzionali, l'ipotesi che l'effetto marginale delle alte temperature per i Paesi ricchi (considerati da soli) sia pari a zero per gli intervalli di temperatura in cui le stime aggregate sono significativamente non nulle (anche se ciò non sorprende, data la riduzione del campione e della distribuzione delle temperature dei Paesi ricchi);
- Non riusciamo a respingere l'ipotesi che l'effetto marginale della bassa temperatura per i Paesi poveri (considerati da soli) sia pari a zero per gli intervalli di temperatura in cui le stime in pool sono significativamente non nulle (anche se questo non sorprende, data la riduzione del campione e della distribuzione delle temperature dei Paesi poveri);
- Troviamo che sia sostanzialmente più probabile che (A) l'effetto marginale delle alte temperature sui Paesi ricchi sia negativo che (B) l'effetto marginale delle alte temperature sui Paesi poveri sia negativo.

Nel complesso, questi risultati forniscono prove limitate dell'eterogeneità tra le risposte dei Paesi ricchi e di quelli poveri, e una forte evidenza del fatto che l'ipotesi che i Paesi ricchi e quelli poveri siano simili è più probabilmente corretta rispetto all'ipotesi di un effetto marginale nullo nei casi in cui i sottocampioni non restituiscono effetti significativi se considerati da soli.

### 3.3 Proiezioni climatiche

PER proiettare gli impatti dei cambiamenti climatici, utilizziamo le nostre funzioni di risposta storiche per generare le variazioni future del PIL in vari scenari di riscaldamento, rispetto a un mondo in cui le temperature sono rimaste fisse alla media del periodo 1980-2020. In particolare, l'evoluzione del PIL pro capite nel Paese  $i$  nell'anno  $t$  è data da:

$$\text{GDP}_{cap,it} = \text{GDP}_{cap,it-1} \cdot (1 + \eta_{it} + \delta_{it}) \quad (3.5)$$

Il tasso di crescita in assenza di cambiamenti climatici è dato da  $\eta_{it}$ , che prendiamo dai Percorsi Socioeconomici Condivisi (SSP) o fissiamo come tasso di crescita medio

nel periodo 1980-2020 (scenario "base"). Gli SSP sono "percorsi di riferimento che descrivono tendenze alternative plausibili nell'evoluzione della società e degli ecosistemi nell'arco di un secolo"<sup>37</sup> e noi ci concentriamo sui due SSP (SSP3 e SSP5) che sono più coerenti con le elevate emissioni necessarie per generare l'RCP8.5. Nell'SSP3, "le emissioni non mitigate sono elevate a causa di una crescita economica moderata, di una popolazione in rapida crescita e di un lento cambiamento tecnologico nel settore dell'energia", mentre nell'SSP5, "In assenza di politiche climatiche, la domanda di energia è elevata e la maggior parte di questa domanda è soddisfatta con combustibili a base di carbonio... Ciononostante, lo sviluppo economico è relativamente rapido"<sup>38</sup>. Entrambi gli scenari SSP specificano traiettorie specifiche per Paese per il reddito medio pro capite, utilizzando modelli demografici per tenere conto dei cambiamenti della popolazione. Come già detto, oltre a questi due SSP, consideriamo anche uno scenario di base in cui si ipotizza che ogni Paese cresca in futuro al tasso medio di crescita osservato nel periodo 1980-2020. In questo scenario di base, utilizziamo le proiezioni demografiche del World Population Prospects<sup>39</sup> delle Nazioni Unite per calcolare il reddito medio pro capite.

Il parametro  $\delta_{it}$  è l'effetto aggiuntivo previsto del riscaldamento sulla crescita di quell'anno. Consideriamo  $\bar{T}_i$  come la temperatura media del Paese  $i$  tra il 1980 e il 2020 (il periodo base) e  $T_{it}^+$  come la temperatura prevista per ogni anno successivo al 2020. Per la nostra funzione di risposta storica stimata  $h(T)$ , tale parametro si ricava dalla seguente Equazione:

$$\delta_{it} = h(T_{it}^+) - h(\bar{T}_i) \quad (3.6)$$

Per le proiezioni in cui la risposta della crescita futura alla temperatura può variare in base al reddito, si indica la funzione di risposta dei Paesi ricchi come  $h_r(\cdot)$ , la funzione di risposta dei Paesi poveri come  $h_p(\cdot)$  e  $y^*$  come il livello di reddito al di sopra del quale le risposte dei paesi sono descritte con  $h_r(\cdot)$  anziché con  $h_p(\cdot)$  (che abbiamo impostato sulla mediana del PIL pro capite nel periodo storico, come nella nostra stima). Quindi  $\delta_{it}$  è calcolato nel seguente modo:

$$\delta_{it} = \begin{cases} h_r(T_{it}^+) - h_r(\bar{T}_i) & \text{per } GDP\ cap_{it-1} > y^* \\ h_p(T_{it}^+) - h_p(\bar{T}_i) & \text{per } GDP\ cap_{it-1} \leq y^* \end{cases} \quad (3.7)$$

---

<sup>37</sup>[O'Neill et al., 2014]

<sup>38</sup>[O'Neill et al., 2014]

<sup>39</sup>[Fragkias et al., 2013]

In base alla precedente Equazione 3.4,

$$h_r(T_{it}) = \beta_1 T_{it} + \beta_2 T_{it}^2 e h_p(T_{it}) = (\beta_1 + \beta_3) T_{it} + (\beta_2 + \beta_4) T_{it}^2$$

Assumiamo un aumento lineare della temperatura tra il 2020 (la fine del periodo di base) e la temperatura prevista dal RCP8.5 per il 2100 in modo tale che per qualsiasi anno  $t > 2020$  e un riscaldamento previsto per il paese di  $\Delta T_i$  entro il 2100 (dove  $\Delta T_i$  è la variazione tra il 2020 e il 2100),  $T_{it}^+ = \Delta T_i \cdot \frac{t-2020}{2100-2020} + \bar{T}_i$ . Quindi, per esempio, se  $\Delta T_i = +4.3^\circ\text{C}$  (che è il cambiamento globale ponderato per la popolazione nella temperatura media prevista dall'RCP8.5), allora nel 2021  $T_{it}^+ = \frac{1}{80} \cdot 4.3^\circ\text{C} + \bar{T}_i = 0.048^\circ\text{C} + \bar{T}_i$ . In assenza di riscaldamento,  $T_{it}^+ = \bar{T}_i$  e  $\delta_{it} = 0$ .

Le nostre stime del riscaldamento specifico per paese  $\Delta T_i$  sono l'insieme del riscaldamento medio previsto per lo scenario RCP8.5 per ciascun Paese in tutti i modelli climatici globali che vengono poi utilizzati per il CMIP6, calcolata facendo per ogni cella della griglia del modello climatico la media ponderata per la popolazione del Paese oggetto dell'analisi. Le variazioni di temperatura previste per il 2100 nei Paesi del nostro campione variano da  $2,9^\circ\text{C}$  a  $6,1^\circ\text{C}$ .

Non sappiamo come la produzione economica risponda a temperature che non sono mai state osservate storicamente. Pertanto, quando i Paesi si riscaldano oltre le massime temperature osservate nei dati storici, abbiamo due opzioni: o estrapoliamo la funzione  $h(\cdot)$  oltre il supporto dei dati osservati storicamente, o assumiamo che la produttività sia uguale al valore limite per tutte le osservazioni oltre il confine del supporto assunto, cioè  $h(T) = h(T_{max})$  per tutte le  $T > T_{max}$ .

Optiamo per quest'ultimo approccio perché lo riteniamo più conservativo, in quanto l'estrapolazione di  $h(\cdot)$  fa sì che il reddito diminuisca ancora più rapidamente a temperature più elevate. Abbiamo fissato  $T_{it}^+$  a  $30^\circ\text{C}$ , che è il limite superiore delle temperature medie annuali osservate nel nostro periodo campione. Pertanto, per ogni anno in cui il riscaldamento previsto aumenterà le temperature medie in un determinato Paese oltre i  $30^\circ\text{C}$ , gli impatti previsti nei Paesi più caldi sono probabilmente conservativi.

Tuttavia, per la maggior parte dei Paesi del campione, un riscaldamento sostanziale (ad esempio  $+4^\circ\text{C}$ ) li porta fuori dal loro intervallo storico di esposizione alle temperature, ma li lascia ben all'interno della distribuzione globale osservata delle temperature storiche, il che significa che il campione preso in considerazione è comunque utilizzabile, corretto e soprattutto conservativo.

Per aggregare i redditi medi nazionali al reddito medio globale, calcoliamo il Prodotto Mondiale Lordo (GWP) per ogni anno futuro  $t$ :

$$\text{GWP}_t = \sum_i \omega_{it} \cdot \text{GDP cap}_{it} \quad (3.8)$$

dove  $\omega_{it}$  è la popolazione prevista del Paese  $i$  nell'anno  $t$ . Questo calcolo viene effettuato separatamente per gli scenari di riscaldamento e per lo scenario controfattuale senza riscaldamento. Come sopra, le proiezioni demografiche specifiche per paese sono tratte dagli SSP o dalle Prospettive demografiche mondiali delle Nazioni Unite, coerentemente con la popolazione utilizzata per calcolare le proiezioni nazionali.

Confrontando le variazioni del GWP per gli scenari di riscaldamento con le variazioni del nostro scenario controfattuale di non riscaldamento, si ottengono le perdite (o i guadagni) globali previsti dai cambiamenti climatici, una stima che può essere confrontata con le "funzioni di danno" attualmente utilizzate dai modelli di valutazione integrata (IAMs)<sup>4041</sup>.

La scelta dello scenario socioeconomico sottostante può influenzare la nostra stima degli impatti globali, alterando il modo in cui gli impatti sono ponderati tra i vari Paesi. Un Paese che si prevede crescerà rapidamente in termini di reddito o di popolazione in un determinato scenario (cioè dove  $\eta_{it}$  o  $\omega_{it}$  sono grandi) riceverà un peso relativo maggiore nella stima della perdita di reddito media globale (in %) rispetto a un paese che si prevede crescerà più lentamente. Quindi le differenze tra gli scenari nei tassi di crescita ipotizzati potrebbero influenzare le stime del  $\text{GWP}_t$ , motivando la nostra inclusione di più scenari socio-economici plausibili.

Le proiezioni regionali sono costruite in modo simile, dove per la regione  $R$ ,

$$\text{GDP}_{Rt} = \sum_{i \in R} \omega_{it} \cdot \text{GDP cap}_{it} \quad (3.9)$$

Definiamo nove regioni basate in gran parte sulle denominazioni ONU<sup>42</sup>, con "Africa subsahariana" che contiene le denominazioni ONU Africa orientale, Africa centrale, Africa meridionale e Africa occidentale; "America latina" che contiene le sottoregioni

---

<sup>40</sup>[Revesz et al., 2014]

<sup>41</sup>Rappresentano strumenti essenziali per la valutazione delle strategie che affrontano i cambiamenti climatici. Un'iniziativa dell'UE ha lavorato per far avanzare ulteriormente lo stato di questi strumenti IAM ai fini dell'analisi delle politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici.

<sup>42</sup>Visionabili a questo link: e <http://unstats.un.org/unsd/methods/m49/m49regin.htm>

ONU Caraibi, America meridionale e America centrale; "Medio Oriente/Africa settentrionale", contenente l'Africa settentrionale e l'Asia occidentale; "Asia centrale e orientale", contenente l'Asia centrale e l'Asia orientale; "Europa", contenente l'Europa orientale, l'Europa settentrionale, l'Europa meridionale e l'Europa occidentale; e "Oceania", contenente l'Australia e la Nuova Zelanda, la Melanesia, la Micronesia e la Polinesia.

Per quantificare l'incertezza di queste proiezioni, effettuiamo un "bootstrap" in blocco della funzione di risposta storica (1000 volte, campionando i Paesi con sostituzione per tenere conto dell'autocorrelazione) e applichiamo la procedura di cui sopra a ciascun bootstrap. Utilizziamo la distribuzione scaturita con questo sistema per caratterizzare l'incertezza delle proiezioni per un determinato insieme di ipotesi sui futuri cambiamenti di temperatura e sui tassi di crescita economica e demografica di base (come appena descritto). Nella Figura 4.8, le proiezioni sono poi "ponderate visivamente"<sup>43</sup> per illustrare la distribuzione delle proiezioni in ogni anno futuro. Ciò avviene calcolando, per ogni anno futuro 2021-2099, la probabilità che un determinato livello di impatto sia osservato nell'insieme di 1000 esecuzioni bootstrap. Il grafico viene quindi ombreggiato in modo che le aree più scure rappresentino i valori per i quali gli impatti previsti erano più probabili. Le probabilità sono fatte in modo da sommare un valore per ogni anno, in modo che l'intervallo di confidenza (rosso) totale sia mantenuto costante in ogni fetta verticale (anno), e quindi appaia più "sparpagliato" quando le proiezioni mostrano una minore probabilità.

### 3.3.1 Campionamento bootstrap

Il bootstrap è un metodo ideato dallo statistico statunitense Bradley Efron nel 1979 che ha lo scopo di stimare determinate caratteristiche di uno stimatore o di una distribuzione in generale. Una distribuzione di probabilità è una funzione che, per un determinato esperimento casuale (che può avere diversi esiti possibili) assegna ad ogni possibile esito una probabilità. Esistono molte variabili di questo tipo a seconda della natura dell'esperimento: ad esempio se viene lanciata una moneta regolare esiste una variabile casuale che si chiama Bernoulliana che assegna ai due esiti possibili Testa e Croce una probabilità pari a  $1/2$  (ovvero il 50%), quindi  $P(T)=1/2$  e  $P(C)=1/2$ . Se invece lanciamo  $n$  monete regolari a 6 facce c'è un'altra variabile che si chiama

---

<sup>43</sup>[Revesz et al., 2014]

Binomiale e così via. È di fondamentale importanza per comprendere al meglio il principio di base della statistica inferenziale, ovvero quella parte di statistica che si occupa di analizzare i dati ottenuti da un campione della popolazione per stimare una quantità sull'intera popolazione di riferimento. Ad esempio, se lo scopo è di stimare il peso medio degli abitanti adulti di Milano, si procede per campione per ovvi motivi di praticità. La variabile “peso” segue una distribuzione di probabilità Normale, che ha una determinata media (l'oggetto di studio) e varianza. Per stimare la media reale, uno dei migliori stimatori è la semplice media aritmetica del campione; si può dire quindi che questo stimatore, chiamato anche media campionaria, descriva piuttosto bene la vera media (che è incognita ed impossibile da sapere esattamente).

In generale, visto che gli stimatori di una quantità sono un'approssimazione del valore reale della stessa, possono presentare alcuni problemi, principalmente di correttezza, ovvero lo stimatore in media non “centra” bene il parametro oggetto di stima. È proprio a questo che servono degli altri elementi che “accompagnano” il valore puro dello stimatore, come gli intervalli di confidenza, che indicano un range di valori plausibili attorno alla stima ed i test, che servono a verificare se la stima si discosta significativamente da un valore fissato. Per entrambe le cose serve conoscere la distribuzione dello stimatore, che può non essere nota. Il bootstrap serve proprio a questo.

L'idea di base del bootstrap è la seguente. Supponiamo, nell'esempio precedente, di voler fare inferenza sul parametro “media campionaria”, non conoscendo la sua distribuzione. Logicamente, se ho raccolto solo un campione di dimensione  $n$ , potrò calcolare solamente una media campionaria, quella sul campione raccolto. Molto frequentemente però questa stima non è così affidabile ed effettuare altri campioni sulla popolazione spesso è troppo costoso e dispendioso in termini di tempo. Quindi si cerca di estrapolare più informazione possibile dall'unico campione a disposizione. Per aggiungere la variabilità che la singola stima non ci permette di avere, si procede con il campionamento con reinserimento, che consiste nel creare degli altri campioni, sempre di dimensione  $N$ , composti da valori presi a caso dal campione originale, anche ripetuti. Su STATA, modello base ricampionato 1000 volte:

```

qui gen UDel_temp_popweight_2 = UDel_temp_popweight^2
qui reg growthWDI UDel_temp_popweight UDel_temp_popweight_2 UDel_precip_popweight UDel_precip_popweight_2 i.year _yi_* _y2_* i.iso_id
post boot (0) (_b[UDel_temp_popweight]) (_b[UDel_temp_popweight_2]) (_b[UDel_precip_popweight]) (_b[UDel_precip_popweight_2])
// now bootstrap model, sampling countries
forvalues nn = 1/1000 {
use C:\Users\eaopol\OneDrive\Desktop\DATABASENUOVO100\data\input\GrowthClimateDataset, clear
bsample, cl(iso_id) //draw a sample of countries with replacement
qui gen UDel_temp_popweight_2 = UDel_temp_popweight^2
qui reg growthWDI UDel_temp_popweight UDel_temp_popweight_2 UDel_precip_popweight UDel_precip_popweight_2 i.year _yi_* _y2_* i.iso_id
post boot ('nn') (_b[UDel_temp_popweight]) (_b[UDel_temp_popweight_2]) (_b[UDel_precip_popweight]) (_b[UDel_precip_popweight_2])
di "'nn'" //print a counter to watch progress
}
postclose boot

```

Figura 3.4: **Script Bootstrap base.** Il primo ciclo è una specifica di base (cioè non ricampionata); i successivi mille sono ricampionati

```

post boot (0) (b[1,1]) (b[1,2]) (b[1,3]) (b[1,4]) (b[1,5]) (b[1,6]) (b[1,7]) (b[1,8]) (b[1,9])
(b[1,10]) (b[1,11]) (b[1,12]) (b[1,13]) (b[1,14]) (b[1,15]) (b[1,16]) (b[1,17]) (b[1,18])
(b[1,19]) (b[1,20]) (b[1,21]) (b[1,22]) (b[1,23]) (b[1,24])
// now bootstrap model, sampling countries.
forvalues nn = 1/1000 {
use C:\Users\eaopol\OneDrive\Desktop\DATABASENUOVO100\data\input\GrowthClimateDataset, clear
bsample, cl(iso_id) idcluster(id) //draw a sample of countries with replacement
qui xtset id year //need to use the new cluster variable it creates.
qui gen UDel_temp_popweight_2 = UDel_temp_popweight^2
qui gen poor = (GDPpctile_WDIppp<50)
qui replace poor=. if GDPpctile_WDIppp==.
qui reg growthWDI poor#c.(L(0/5).(UDel_temp_popweight UDel_temp_popweight_2
UDel_precip_popweight UDel_precip_popweight_2)) i.year _yi_* _y2_* i.iso_id
mat b = e(b)
post boot ('nn') (b[1,1]) (b[1,2]) (b[1,3]) (b[1,4]) (b[1,5]) (b[1,6]) (b[1,7])
(b[1,8]) (b[1,9]) (b[1,10]) (b[1,11]) (b[1,12]) (b[1,13]) (b[1,14]) (b[1,15])
(b[1,16]) (b[1,17]) (b[1,18]) (b[1,19]) (b[1,20]) (b[1,21]) (b[1,22]) (b[1,23]) (b[1,24])
di "'nn'"
}

```

Figura 3.5: **Script Bootstrap ricchi e poveri con 5 lags.**

## 3.4 Differenti modelli e ritardi sulla temperatura

PER capire la sensibilità delle nostre proiezioni d'impatto alle ipotesi, esploriamo come cambiano le proiezioni quando (i) la funzione di risposta alla temperatura è stimata usando ipotesi diverse e (ii) adottiamo ipotesi diverse sull'evoluzione futura della popolazione e dell'attività economica in assenza di cambiamenti climatici. In primo luogo, modifichiamo il fatto che la proiezione tenga conto degli effetti climatici ritardati (per semplicità) e che si ipotizzi che i Paesi ricchi e quelli poveri abbiano risposte diverse (sebbene i dati non respingano l'ipotesi che la risposta aggregata sia rappresentativa, come discusso in precedenza). Per fare ciò, generiamo quattro stime separate:

1. *Pooled SR*: presuppone una risposta comune tra paesi ricchi e poveri ai cambiamenti di temperatura, e che la crescita in un determinato anno sia influenzata solo dalla temperatura di quell'anno (da qui "SR" per "short run"). Questa è la stima di riferimento presentata nella Figura 4.1a;

2. *Pooled LR*: ipotizza una risposta comune tra Paesi ricchi e poveri alle variazioni di temperatura, ma la crescita in un determinato anno può essere influenzata dalla temperatura di quell'anno e dei 5 anni precedenti (da qui "LR" per "lungo periodo"). Gli effetti marginali di questo modello sono mostrati nella Figura 4.6c;
3. *SR Differentiated*: consente ai Paesi ricchi e a quelli poveri di rispondere in modo diverso alle variazioni di temperatura, e la crescita in un determinato anno è influenzata solo dalla temperatura di quell'anno. Questa è la stima presentata nella Figura 4.1b. Se i Paesi poveri crescono in modo tale che il loro reddito superi la soglia di reddito utilizzata per separare i Paesi ricchi da quelli poveri, allora automaticamente rientreranno a far parte dei Paesi ricchi così da mostrare una corretta evoluzione della crescita di quest'ultimi Paesi, come nell'Equazione 3.7;
4. *LR Differentiated*: consente ai Paesi ricchi e poveri di rispondere in modo diverso ai cambiamenti di temperatura e ai Paesi poveri (potranno dunque rispondere come nello scenario precedente), ma la crescita in un dato anno può essere differenziata, può essere, infatti, influenzata dalla temperatura di quell'anno e dei 5 anni precedenti.

Le stime regionali sono mostrate nella Figura 4.8, con la linea nera in ogni grafico che rappresenta la migliore ipotesi degli impatti previsti (cioè utilizzando le nostre stime puntuali) e l'area ombreggiata in rosso l'intervallo di confidenza dal 5% al 95%, con l'intensità del colore che indica ancora una volta la probabilità che la stima di proiezione cada su un determinato valore in un determinato anno.

Nei modelli che tengono conto degli effetti ritardati o che stimano separatamente le risposte dei ricchi e dei poveri, le proiezioni diventano più incerte. Ciò è dovuto sia al fatto che la funzione di risposta stimata per i Paesi ricchi è leggermente più piatta rispetto alla funzione di risposta aggregata, il che altera leggermente i danni stimati in regioni come il Nord America, ma anche al fatto che la funzione di risposta stimata per i Paesi poveri raggiunge picchi di qualche grado più caldo (30°C) rispetto alla funzione di risposta aggregata, il che serve a ridurre leggermente i danni anche nei Paesi poveri.

Tuttavia, a causa della maggiore incertezza nelle funzioni di risposta specifiche per reddito, dovuta alla suddivisione del campione (nel modello differenziato) e alla contabilizzazione di parametri incerti aggiuntivi (nel modello LR), l'incertezza complessiva delle proiezioni con questi modelli è maggiore rispetto al modello SR aggregato.

Un'altra importante differenza è che per i modelli LR, la proiezione media è sostanzialmente negativa per tutte le regioni, perché le regioni più fredde (ad esempio l'Europa) presentano impatti netti negativi nei modelli che consentono agli effetti di crescita di un singolo anno caldo di persistere per più anni. La ragione di ciò è illustrata nella Figura 4.6c: dove è possibile osservare che un aumento dei ritardi abbassa soprattutto la temperatura dei Paesi caldi, mentre i Paesi più freddi non ne traggono più un beneficio inequivocabile, con stime puntuali degli effetti marginali che sono negativi in tutta la distribuzione delle temperature. Ciò significa che valutare gli impatti del riscaldamento futuro utilizzando le funzioni di risposta storiche di "lungo periodo" rende gli impatti economici più negativi per i Paesi inizialmente freddi.

Successivamente, valutiamo se le nostre proiezioni globali sono sensibili a queste ipotesi di modellazione, esaminando anche la loro sensibilità alle ipotesi sulla traiettoria economica di base dei Paesi. I tre scenari socioeconomici che valutiamo sono:

1. *base*: in assenza di cambiamenti climatici, i redditi pro capite dei Paesi crescono ogni anno nel futuro al livello della crescita media calcolata tra il 1980 e il 2010. Le stime delle popolazioni future a livello di ogni Paese sono date dalle proiezioni delle Nazioni Unite.<sup>44</sup>;
2. *SSP3*: un "percorso socio-economico condiviso" con una crescita del reddito generalmente più lenta e una minore convergenza a lungo termine dei livelli di reddito tra Paesi poveri e ricchi. In questo scenario, il tasso di crescita medio globale ponderato per la popolazione senza cambiamenti climatici è dell'1,2% nel 2050 e dell'1,1% nel 2090;
3. *SSP5*: un "percorso socioeconomico condiviso" con una crescita del reddito generalmente più elevata e una più rapida convergenza a lungo termine dei livelli di reddito tra paesi poveri e ricchi. In questo scenario, la crescita media globale ponderata per la popolazione in assenza di cambiamenti climatici è del 3,6% nel 2050 e del 2,3% nel 2090.

La Tabella 4 fornisce le stime puntuali e i percentili corrispondenti nella distribuzione delle risposte per ogni scenario.

Analogamente alle proiezioni regionali, le stime medie sono uniformemente più negative con le funzioni di risposta LR che consentono alla temperatura di avere effetti

---

<sup>44</sup>[Fragkias et al., 2013]

persistenti sulla crescita. Analogamente alle proiezioni regionali, le stime sono più incerte - ma leggermente meno negative - quando si utilizzano le funzioni di risposta che consentono ai Paesi ricchi e poveri di rispondere in modo diverso al riscaldamento. Lo scenario socioeconomico assunto ha un impatto minimo sulle variazioni previste del GWP.

Nella Figura 4.8 vengono rappresentati gli impatti previsti dal cambiamento climatico (RCP8.5) entro il 2100 rispetto ad un mondo senza cambiamenti, per diverse funzioni di risposta storiche e diversi scenari socioeconomici futuri.

Facendo eco ai risultati globali, gli impatti sono più uniformemente negativi lungo la distribuzione del reddito quando si include un numero crescente di lag della temperatura. Questo perché l'effetto marginale stimato - come abbiamo visto anche precedentemente - della temperatura diventa leggermente negativo anche a temperature fredde nei modelli storici multi-lag in cui gli effetti di crescita sono lasciati persistere, il che significa che anche i Paesi ricchi peggiorano anche a fronte di un leggero riscaldamento. L'utilizzo di una funzione di risposta differenziata tra Paesi ricchi e poveri ha un effetto limitato, perché questi due sottocampioni si comportano entrambi in modo simile alla stima aggregata.

### 3.5 Funzione di danno

**S**TIMIAMO una "funzione di danno" globale proiettando gli impatti economici in funzione delle future variazioni della temperatura media globale. Per costruire questa funzione, ripetiamo l'esercizio di proiezione descritto in precedenza, ma con quantità alternative di riscaldamento nel 2100.<sup>45</sup> Per far coincidere le stime del modello di valutazione integrata (IAMS), le variazioni di temperatura sono calcolate "rispetto al periodo preindustriale" anziché rispetto al giorno d'oggi, come nelle nostre analisi precedenti.

Per convertire le variazioni della temperatura media globale in stime specifiche per Paese, necessarie per i nostri calcoli, scaliamo linearmente le variazioni specifiche per Paese  $\Delta T_i$  (media dell'insieme CMIP6 sotto RCP8.5) con la temperatura media globale, correggendo il riscaldamento già avvenuto. In particolare, lasciamo che  $\overline{\Delta T^{(rcp8.5)}}$  sia la variazione di temperatura media globale per RCP8.5 e che  $\Delta T_i$  sia il cambiamento di

---

<sup>45</sup>[Revesz et al., 2014]

temperatura previsto per ogni singolo Paese (come descritto sopra). Il nostro fattore di scala è quindi  $\lambda_i = \Delta T_i / \overline{\Delta T^{(rcp8.5)}}$ .

Per la maggior parte dei Paesi, lasciamo  $\lambda_i > 1$  perché le superfici terrestri tendono a riscaldarsi più degli oceani, che hanno un peso sostanziale nelle medie globali. Quindi, per un arbitrario aumento della media globale rispetto al periodo preindustriale, e variazioni di temperatura specifiche per paese tra il 2020 e il 2100 per quello scenario sono stimate come segue:

$$\Delta T_i^s = \lambda_i(\Delta \bar{T}^s - 0.8) \quad (3.10)$$

dove  $0,8^\circ\text{C}$  è il riscaldamento medio tra il periodo pre-industriale e quello attuale. Costruiamo quindi la nostra funzione di danno a partire da  $+0,8^\circ\text{C}$  rispetto al periodo preindustriale (il che significa un aumento della temperatura globale di  $+0^\circ\text{C}$  entro il 2100 rispetto a oggi, cioè nessun riscaldamento aggiuntivo oltre a quello già avvenuto).

Quindi  $+1^\circ\text{C}$  per la funzione di danno mostrata nella Figura 4.8d corrisponde a un riscaldamento di  $+0,2^\circ\text{C}$  entro il 2100 rispetto a oggi,  $+2^\circ\text{C}$  nella Figura 4.8d corrisponde a  $+1,2^\circ\text{C}$ , ecc. Le proiezioni sono poi calcolate come sopra, con l'ipotesi di un riscaldamento lineare tra il giorno d'oggi e il 2100, e l'incremento di riscaldamento per per ogni Paese in un determinato anno  $t$ , applicato al livello del PIL pro capite dell'anno precedente per ottenere il PIL pro capite di quel Paese nell'anno  $t$ .

```

for (scen in c(1,4,6)) {
  growthproj <- growthProjections[[scen]] #select growth projections
  popproj <- popProjections[[scen]] # select population projections

  basegdp = popproj$gdpCap #baseline GDP/cap
  temp <- popproj$meantemp #baseline temperature.

  GDPcapCC = GDPcapNoCC = array(dim=c(dim(growthproj)[1],length(yrs),np)) #array to fill with GDP/cap for each country
  dimnames(GDPcapCC) <- dimnames(GDPcapNoCC) <- list(growthproj[,1],yrs,1:np)
  GDPcapCC[,1,] = GDPcapNoCC[,1,] = basegdp #initialize with baseline per cap GDP
  tots = array(dim=c(np,length(yrs),4))
  #array to hold average global per cap GDP and total global GDP across scenarios, with and without climate change
  dimnames(tots) <- list(1:np,yrs,c("avgGDPcapCC","avgGDPcapNoCC","TotGDPCC","TotGDPNoCC"))

  for (tt in 1:np) { #looping over bootstrap estimates
    bg = prj$temp[tt]*temp + prj$temp2[tt]*temp*temp
    #this finds the predicted growth level for each country's temperature for the particular bootstrap run
    for (i in 2:length(yrs)) {
      j = i - 1
      y = yrs[i]
      basegrowth <- growthproj[,which(names(growthproj)==y)]
      #growth rate without climate change
      GDPcapNoCC[,i,tt] = GDPcapNoCC[,j,tt]*(1+basegrowth)
      #last year's per cap GDP times this years growth rate, as projected by scenario
      newtemp = temp+j*ccd
      dg = prj$temp[tt]*newtemp + prj$temp2[tt]*newtemp*newtemp
      #predicted growth under new temperature
      dg[newtemp>30] = prj$temp[tt]*30 + prj$temp2[tt]*30*30
      #constrain response to response at 30C if temp goes above that. this is so we are not projecting out of sample

      diff = dg - bg #difference between predicted baseline growth and predicted growth under new temp
      GDPcapCC[,i,tt] = GDPcapCC[,j,tt]*(1+basegrowth + diff)
      #last year's GDPcap (w/ climate change) times climate-adjusted growth rate for this year

      #now calculate global average per cap GDP, weighting by population
      wt = popproj[,which(names(popproj)==y)] #population weights
      tots[tt,i,1] <- round(weighted.mean(GDPcapCC[,i,tt],wt),3) # per cap GDP, with climate change
      tots[tt,i,2] <- round(weighted.mean(GDPcapNoCC[,i,tt],wt),3) # per cap GDP, no climate change
      #total GDP with and without climate change. multiplying by 1e6 because population is in millions
      tots[tt,i,3] <- sum(GDPcapCC[,i,tt]*wt*1e6) #with climate change
      tots[tt,i,4] <- sum(GDPcapNoCC[,i,tt]*wt*1e6) #without climate change
    }
  }
}

```

Figura 3.6: Script per modello Pooled senza Lags, per tutti i 3 scenari presi in considerazione.

## 4. Risultati

COME già descritto nel Capitolo precedente, ho verificato quanto emerso dall'Equazione 2.1.1. Per farlo ho preso in considerazione 183 paesi del Mondo, in un periodo base che va dal 1960 al 2020. In un esperimento ideale, dovrei confrontare due Paesi identici, riscaldare la temperatura di uno di essi e confrontare la sua produzione economica con quella dell'altro.

In pratica, è più fruttuoso svolgere questo tipo di esperimento confrontando il Paese con se stesso negli anni in cui è esposto ad una temperatura o più calda o più fredda della media<sup>1</sup> a causa di cambiamenti atmosferici stocastici naturali. In breve, un'economia osservata durante un anno freddo rappresenta il controllo mentre la stessa società osservata in un anno caldo, rappresenta lo scenario trattato.

Innanzitutto ho stimato la variazione della produzione economica rispetto all'anno precedente, ovvero la crescita economica annuale, per eliminare fattori secolari di ogni economia, che si evolvono in base alla temperatura. Successivamente si elimina la crescita economica da diversi fattori tra cui:

- Tutte le differenze costanti tra Paesi, ad esempio la cultura o la storia;
- tutti gli shock contemporanei comuni, ad esempio le variazioni di prezzo globali o le innovazioni tecnologiche;
- le tendenze quadratiche dei tassi di crescita specifici di ogni Paese, che possono derivare, ad esempio, dal cambiamento delle istituzioni politiche o dalle politiche economiche;
- e gli effetti possibilmente non lineari della temperatura media annuale e delle precipitazioni.

Questo approccio è più affidabile rispetto alla possibilità di aggiustare le soli variabili osservate, perché tiene conto di covariate non osservate ma che comunque influenzano i diversi Paesi in modi differenti<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>[Deaton, 1989]

<sup>2</sup>[Moore and Diaz, 2015]

In sostanza, dopo aver tenuto conto di eventuali shock comuni a tutti i Paesi, analizziamo se le deviazioni specifiche dei Paesi dai trend di crescita sono correlate in modo non lineare a deviazioni specifiche del Paese rispetto all'andamento della temperatura e delle precipitazioni. Scopriamo che la produzione economica a livello nazionale è regolare, non lineare e concava in funzione della temperatura (Figura 4.1*a*), con un massimo a 14°C, ben al di sotto dei valori soglia rilevati a microlivello e coerenti con le previsioni dell'Equazione 2.1.1. La produttività dei paesi freddi aumenta con l'aumentare della temperatura annuale, fino al valore ottimale. La produttività diminuisce gradualmente con l'ulteriore riscaldamento e questo declino accelera a temperature più elevate (Figura 4.3).

Il risultato è rappresentativo a livello globale e non è determinato da valori anomali (Figura 4.3*h*). È stato utilizzato per tutte le altre procedure di stima che hanno consentito: di modificare la risposta dei Paesi man mano che diventano più ricchi (Figura 4.4*h* e la Tabella 4.1), di utilizzare polinomi di ordine superiore o spline cubiche per modellare gli effetti della temperatura (Figura 4.5 *j-k*), di escludere i Paesi con poche osservazioni, di escludere i principali produttori di petrolio, di escludere la Cina e gli Stati Uniti, di tenere conto degli shock economici annuali specifici dei continenti<sup>3</sup>, di indebolire le ipotesi sulle tendenze di crescita, di tenere conto di più ritardi di crescita e di utilizzare fonti di dati economici alternativi<sup>4</sup> (Tabella 4.1).

La contabilizzazione degli effetti ritardati della temperatura, che potrebbe essere importante se i Paesi "recuperano" dopo perdite temporanee, aumenta l'incertezza statistica ma non altera l'effetto medio negativo netto delle temperature elevate (Figura 4.6*a-c*). Questo comportamento "senza recupero" è coerente con la risposta osservata ad altre perturbazioni climatiche, come i cicloni tropicali<sup>5</sup>.

Mentre gran parte della produzione economica globale si raggruppa vicino all'optimum di temperatura stimato (Figura 4.1*a*), sia i Paesi ricchi che quelli poveri mostrano risposte non lineari simili alla temperatura (Figura 4.1*b*). I Paesi tropicali poveri mostrano risposte maggiori soprattutto perché sono mediamente più caldi, non perché sono più poveri (Figura 4.3*i* e la Tabella 4.1). Ci sono prove che potrebbero indicare che i Paesi ricchi possono essere un po' meno influenzati dalla temperatura, come precedentemente ipotizzato<sup>6</sup>, ma abbiamo visto che la loro risposta è statisticamente

---

<sup>3</sup>[Udry, 1995]

<sup>4</sup>[Anttila-Hughes and Hsiang, 2013]

<sup>5</sup>[Moore and Diaz, 2015]

<sup>6</sup>[Hsiang, 2010c]

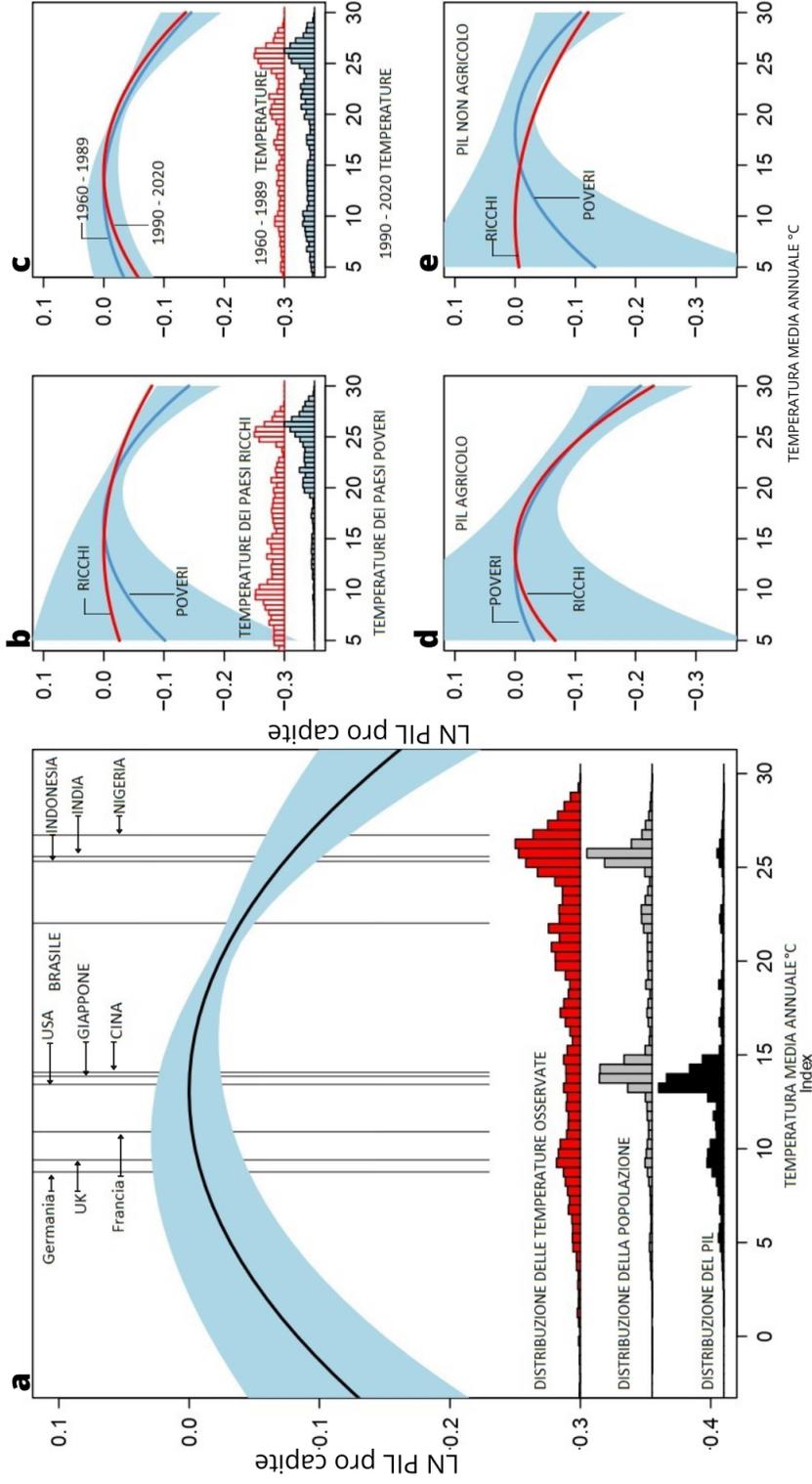


Figura 4.1: **Effetto della temperatura media annuale sulla produzione economica a**, Rappresenta la relazione globale tra la temperatura media annua e la variazione del PIL pro capite (linea nera) nel periodo 1960-2020 con un intervallo di confidenza del 90%. Le linee verticali indicano, invece, la temperatura media dei paesi selezionati. Gli istogrammi mostrano la distribuzione globale dell'esposizione alla temperatura (rosso) alla popolazione (grigio) e del reddito (nero). **b**, Mostra il confronto tra Paesi ricchi e Paesi poveri (sotto la mediana). La parte di colore blu, rappresenta l'intervallo di confidenza 90% per i Paesi poveri. **c** Stesso modello di prima ma dividendo i periodi. **d-e** Come il modello **b** ma per il reddito agricolo e quello non agricolo.

indistinguibile, quasi uguale a da quella dei Paesi poveri a tutte le temperature (Figura 4.7*d-f* e Tabella 4.2).

Sebbene la stima dell'effetto totale delle alte temperature sui Paesi ricchi sia sostanzialmente meno certa perché nel campione ci sono pochi Paesi ricchi e caldi, la non linearità della risposta dei soli Paesi ricchi è statisticamente significativa ( $P = 0,1$ ; Tabella 4.2) e stimiamo una probabilità dell'80% che l'effetto marginale del riscaldamento sia negativo alle alte temperature in questi Paesi (Figura 4.5*m*). La nostra scoperta che i Paesi ricchi rispondono in maniera non lineare alla temperatura è coerente con i recenti risultati a livello di Stati negli Stati Uniti<sup>7</sup>.

I nostri risultati non lineari sono anche coerenti con il risultato precedente di assenza di correlazione lineare tra temperatura e crescita nei Paesi ricchi<sup>8</sup>. Poiché la distribuzione delle temperature nei Paesi ricchi è approssimativamente simmetrica rispetto all'optimum, la regressione lineare non rileva alcuna associazione. La contabilizzazione della non linearità riconcilia questo risultato precedente, ma inverte il modo in cui la ricchezza e la tecnologia sono intese per mediare le risposte economiche alla temperatura. Non risulta che i progressi tecnologici o l'accumulo di ricchezza e conoscenze dal 1960 abbiano alterato in modo sostanziale la relazione tra produttività e temperatura.

I risultati ottenuti utilizzando i dati del periodo 1960-1989 e 1990-2020 sono quasi identici (Figura 4.1*c*). In accordo con le recenti evidenze a livello micro<sup>9</sup>, il sostanziale riscaldamento osservato nel periodo non ha apparentemente indotto un notevole adattamento. Coerentemente con i risultati a microlivello, secondo cui la produttività agricola e non agricola legata al lavoro è altamente non lineare rispetto alla temperatura istantanea<sup>10</sup> troviamo che la produzione aggregata agricola e non agricola non è lineare rispetto alla temperatura media annuale sia per i Paesi ricchi che per quelli poveri (Figura 4.1*d* e Figura 4.7*g-l*).

Le basse temperature non hanno effetti significativi su questi sottocampioni, anche se l'esposizione limitata dei Paesi poveri a queste temperature limita fortemente la precisione statistica. Le alte temperature hanno effetti negativi significativi in tutti i casi per i Paesi poveri ed effetti significativi o marginalmente significativi per i Paesi ricchi (Figura 4.7*m-u*).

---

<sup>7</sup>[Deschênes and Greenstone, 2011]

<sup>8</sup>[Hsiang, 2010c]

<sup>9</sup>[Deschênes and Greenstone, 2011][Barro and Sala-i Martin, 2003]

<sup>10</sup>[Graff Zivin and Neidell, 2014b][Graff Zivin et al., 2018][Heal and Park, 2013a]

Una risposta globale non lineare della produzione economica alla temperatura annuale ha importanti implicazioni per il probabile impatto economico del cambiamento climatico. Troviamo solo una debole evidenza suggestiva che popolazioni più ricche sono meno vulnerabili al riscaldamento, e nessuna prova che l'esperienza con le alte temperature o i progressi tecnologici dal 1960 abbiano alterato la risposta globale alla temperatura. Questo suggerisce che l'adattamento al cambiamento climatico potrebbe essere più difficile di quanto ritenuto in precedenza<sup>11</sup> e che l'accumulo di ricchezza, tecnologia ed esperienza potrebbe non mitigare sostanzialmente le perdite economiche globali nel corso di questo secolo<sup>12</sup>.

Ho quantificato l'impatto potenziale del riscaldamento sui redditi nazionali e globali combinando la funzione di risposta non lineare stimata con scenari "business as usual" (Representative Concentration Pathway (RCP)8.5) di riscaldamento futuro e con diverse ipotesi di crescita economica e demografica di base<sup>13</sup> (come visibile nel capitolo 3.2). Questo approccio presuppone che le economie future rispondano ai cambiamenti di temperatura in modo simile alle economie odierne, forse un'ipotesi ragionevole data la mancanza di adattamento osservata durante il nostro campione di 60 anni.

Nel 2100, secondo le stime ottenute, il cambiamento climatico non mitigato renderà il 77% dei Paesi più poveri in termini pro capite rispetto a quelli che sarebbero senza il cambiamento climatico.

Il cambiamento climatico potrebbe rendere alcuni Paesi più poveri in futuro di quanto non lo siano oggi, a seconda dei tassi di crescita secolari ipotizzati. Con una crescita di base elevata e un cambiamento climatico non mitigato (RCP8.5 e Shared Socio-economic Pathway (SSP)5, si prevede che nel 2100 il 5% dei Paesi sarà più povero di oggi, mentre con una crescita bassa lo sarà il 43% (SSP3).

Le differenze nell'impatto previsto del riscaldamento sono principalmente funzioni delle temperature di base dei Paesi, poiché il riscaldamento aumenta la produttività nei Paesi freddi (Figura 4.2). In particolare, l'Europa potrebbe beneficiare dell'aumento delle temperature medie. Poiché il riscaldamento danneggia la produttività nei Paesi con temperature medie elevate, si prevede che i redditi delle regioni povere diminuiranno rispetto a un mondo senza cambiamenti climatici con un'elevata confidenza ( $P < 0,01$ ), indipendentemente dall'approccio statistico utilizzato. I modelli che tengono conto degli effetti ritardati prevedono impatti più negativi nelle regioni ricche e più fredde; le

---

<sup>11</sup>[Burke et al., 2014][Masseti et al., 2014]

<sup>12</sup>[Deschênes and Greenstone, 2011],[Barro and Sala-i Martin, 2003]

<sup>13</sup>[Information et al., 2012]

proiezioni che ipotizzano che i paesi ricchi e poveri rispondono in modo diverso (Figura 4.1b) sono più incerte per via del numero inferiore di dati utilizzati per stimare ciascuna risposta.

L'impatto del riscaldamento sulla produzione economica globale è una media ponderata per la popolazione degli impatti a livello di Paese. Utilizzando il nostro modello di riferimento (Figura 4.1a), i cambiamenti climatici riducono la produzione globale prevista del 23% nel 2100 (stima migliore, SSP5) rispetto a un mondo senza cambiamenti climatici, sebbene l'incertezza statistica consenta impatti positivi con una probabilità bassa, cioè dello 0,29 (Figura 4.8).

Le stime variano in grandezza, ma non nella struttura, a seconda dell'approccio statistico. I modelli con impatti ritardati prevedono perdite maggiori perché i Paesi freddi guadagnano meno, mentre i modelli differenziati ricchi-poveri hanno perdite più contenute (l'incertezza statistica consente esiti positivi con probabilità 0,09-0,40).

I modelli che consentono sia gli impatti ritardati sia le risposte differenziate ricchi-poveri (l'approccio più flessibile) prevedono perdite globali 2 volte più grandi rispetto al nostro approccio di riferimento. In tutti i casi, la probabilità di perdite globali è sostanziale: le perdite globali superano il 20% del reddito con probabilità 0,44-0,87 (Figura 4.8 e Tabella 4).

Tenere conto dell'effetto non lineare della temperatura a livello globale è cruciale per costruire proiezioni di reddito nell'ambito dei cambiamenti climatici perché si prevede che in futuro i Paesi diventeranno sia più caldi che più ricchi. In un'analisi precedente, in cui si ipotizzava una relazione lineare non è stato osservato alcun effetto lineare significativo nei Paesi ricchi<sup>14</sup> è stato ipotizzato che i Paesi si adattassero efficacemente alla temperatura man mano che diventavano più ricchi. Secondo questa ipotesi, gli impatti del riscaldamento futuro dovrebbero diminuire nel tempo con l'aumentare della ricchezza dei Paesi.

Al contrario, quando teniamo conto dell'effetto non lineare della temperatura, troviamo che i Paesi ricchi e quelli poveri si comportano in modo simile a temperature simili, offrendo poche prove di adattamento. Ciò indica che non possiamo dare per scontato che i Paesi ricchi non saranno influenzati dal riscaldamento futuro, né possiamo supporre che gli impatti del riscaldamento futuro si attenueranno nel tempo, man mano che i Paesi diventano più ricchi.

---

<sup>14</sup>[Hsiang, 2010c]

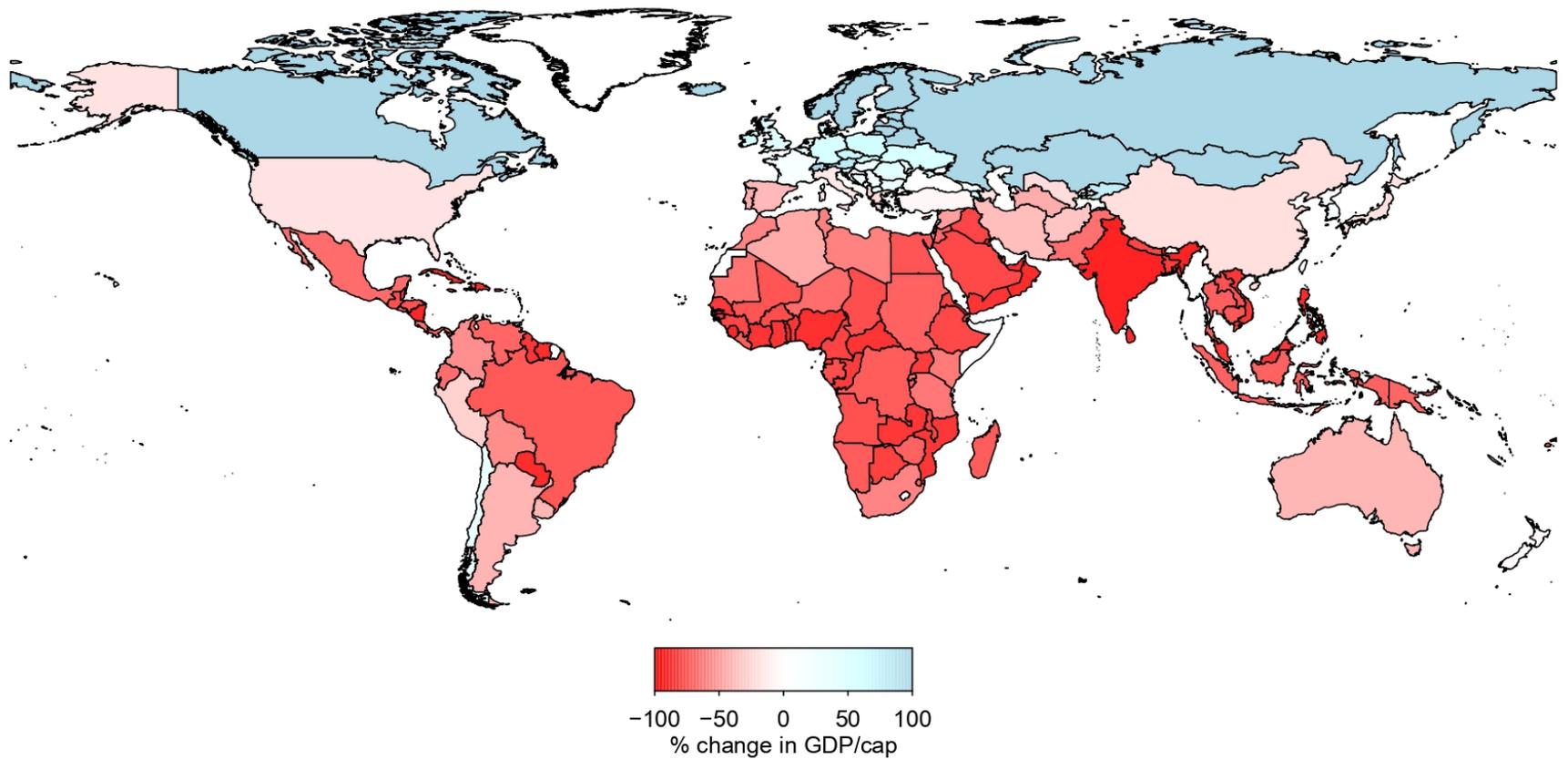


Figura 4.2: **Effetto previsto dei cambiamenti di temperatura sulle economie regionali.** Variazione del PIL pro capite (RCP8.5, SSP5) rispetto alla proiezione con temperature medie costanti 1980-2020. Stime a livello di Paese nel 2100.

Piuttosto, l'impatto di un ulteriore riscaldamento peggiora nel tempo man mano che i Paesi diventano più caldi. Di conseguenza, le proiezioni effettuate con approcci lineari e non lineari divergono sostanzialmente - di circa il 50-200% nel 2100 - evidenziando l'importanza di tenere conto di questa non linearità nel valutare gli impatti del riscaldamento futuro.

La forte correlazione negativa tra il reddito di base e la temperatura di base indica che il riscaldamento potrebbe amplificare la disuguaglianza globale perché i Paesi caldi e poveri subiranno probabilmente la maggiore riduzione della crescita. Nella nostra stima di riferimento, il reddito medio del 40% più povero dei Paesi diminuisce del 75% entro il 2100 rispetto a un mondo senza cambiamenti climatici, mentre il 20% più ricco registrerà lievi guadagni, poiché sono generalmente più freddi. I modelli con impatti ritardati non prevedono differenze così drammatiche, perché anche i Paesi più freddi subiscono grandi perdite (Figura 4.8).

Utilizziamo i nostri risultati per costruire una "funzione di danno" empirica che mappa il cambiamento di temperatura globale e le perdite economiche globali aggregando le proiezioni a livello di Paese. Le funzioni di danno sono ampiamente utilizzate nei modelli economici del riscaldamento globale, ma in precedenza si basavano su altre teorie<sup>15</sup>.

Utilizzando i nostri risultati empirici, abbiamo proiettato le variazioni della produzione globale nel 2100 per diverse variazioni di temperatura (Figura 4.8d) e li confrontiamo con le funzioni di danno precedentemente stimate<sup>16</sup>. Le funzioni comunemente utilizzate rientrano nell'incertezza stimata, ma si differenziano per due aspetti importanti.

In primo luogo, le perdite globali previste sono all'incirca lineari - e leggermente concave - rispetto alla temperatura e non quadratiche o esponenziali come precedentemente ipotizzato. L'approssimazione della linearità deriva dall'ampia distribuzione dell'esposizione alla temperatura all'interno dei Paesi, che fa sì che la derivata media ponderata per Paese della funzione di produttività della Figura 4.1a cambi poco con il riscaldamento dei Paesi e impedisce brusche transizioni nella produzione globale, anche se il contributo delle singole unità produttive è altamente non lineare (vedere Figura 2.1). Le perdite globali sono leggermente concave rispetto alla temperatura globale, perché l'effetto della crescita negativa composta diminuisce nel tempo. Queste proprietà sono indipendenti dallo scenario di crescita e dalla funzione di risposta.

---

<sup>15</sup>[Schlenker et al., 2006],[Greene and Hensher, 2003]

<sup>16</sup>[Greene and Hensher, 2003]

In secondo luogo, la pendenza della funzione di danno è grande anche per un leggero riscaldamento, generando costi previsti per il cambiamento climatico da 2,5 a 100 volte più grandi rispetto alle stime precedenti per un riscaldamento di 2 °C, e almeno 2,5 volte più grandi per temperature più elevate. In particolare, le nostre stime si basano solo sugli effetti della temperatura (o sugli effetti per i quali la temperatura storica è stata una proxy), quindi non includono altre potenziali fonti di perdita economica associate al cambiamento climatico, come i cicloni tropicali<sup>17</sup> o l'innalzamento del livello del mare<sup>18</sup>, inclusi nelle precedenti stime dei danni.

Se le società continueranno a funzionare come nel recente passato, si prevede che il cambiamento climatico rimodellerà l'economia globale, riducendo sostanzialmente la produzione economica mondiale ed eventualmente amplificando le disuguaglianze economiche esistenti a livello globale, rispetto a un mondo senza cambiamenti climatici. Adattamenti come innovazioni senza precedenti<sup>19</sup> o investimenti difensivi<sup>20</sup> potrebbero ridurre questi effetti, ma i conflitti sociali<sup>21</sup> o le interruzioni del commercio<sup>22</sup> - dovute a restrizioni politiche o a perdite correlate in tutto il mondo - potrebbero aggravare la situazione.

---

<sup>17</sup>[Moore and Diaz, 2015]

<sup>18</sup>[Feenstra et al., 2015b]

<sup>19</sup>[Matsuura and Willmott, 2012]

<sup>20</sup>[Doxsey-Whitfield et al., 2015]

<sup>21</sup>[Burke and Emerick, 2016]

<sup>22</sup>[Hsiang and Jina, 2014b]

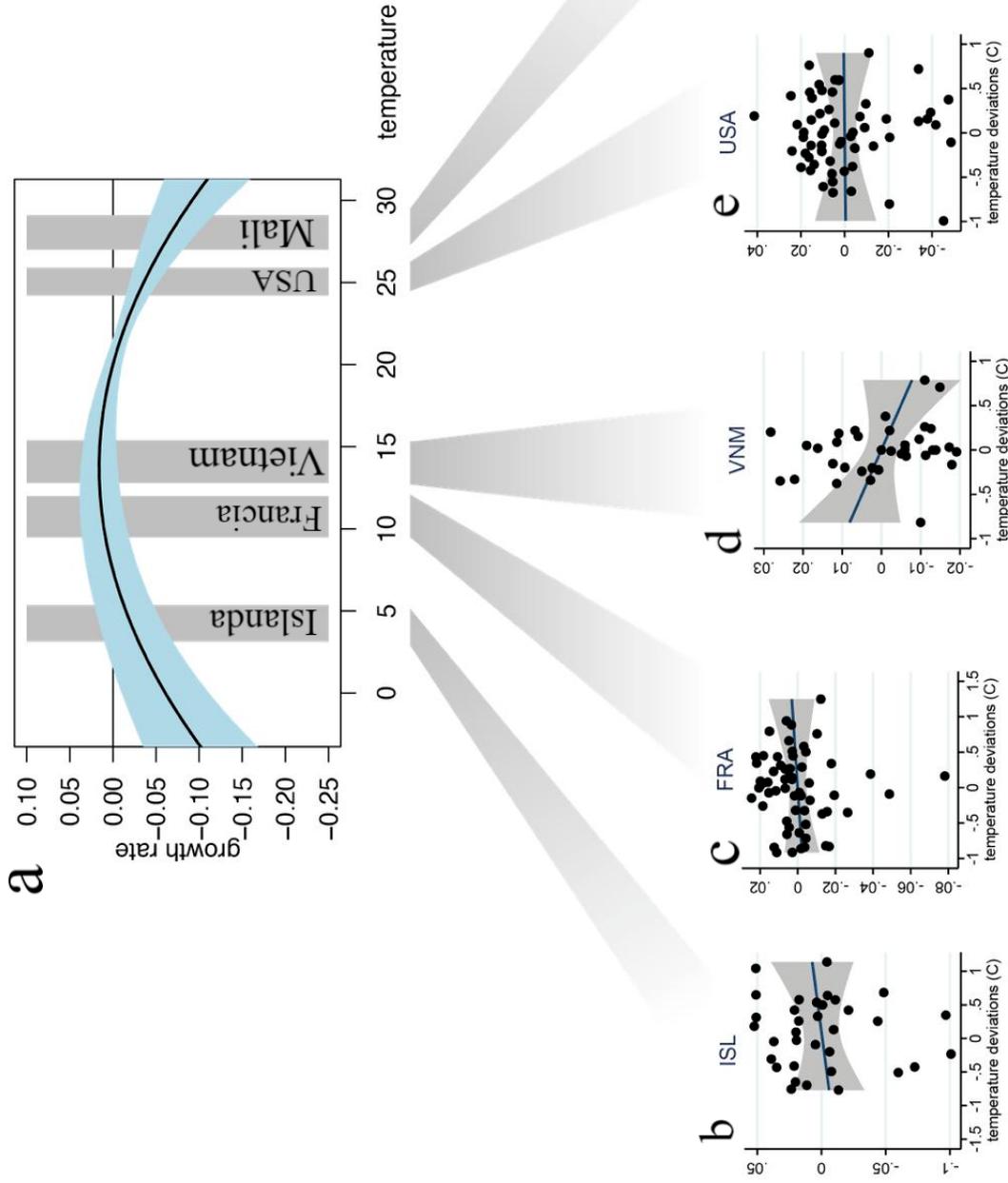


Figura 4.3: **Funzione di risposta** La risposta globale non lineare riflette i diversi effetti marginali della temperatura a diverse temperature medie. I grafici rappresentano le relazioni specifiche di alcuni Paesi tra temperatura e crescita nel periodo campione, dopo aver tenuto conto dei controlli nell'equazione 3.1; i punti sono le osservazioni annuali per ciascun Paese, la linea scura la relazione lineare stimata, l'area grigia l'intervallo di confidenza al 95%.

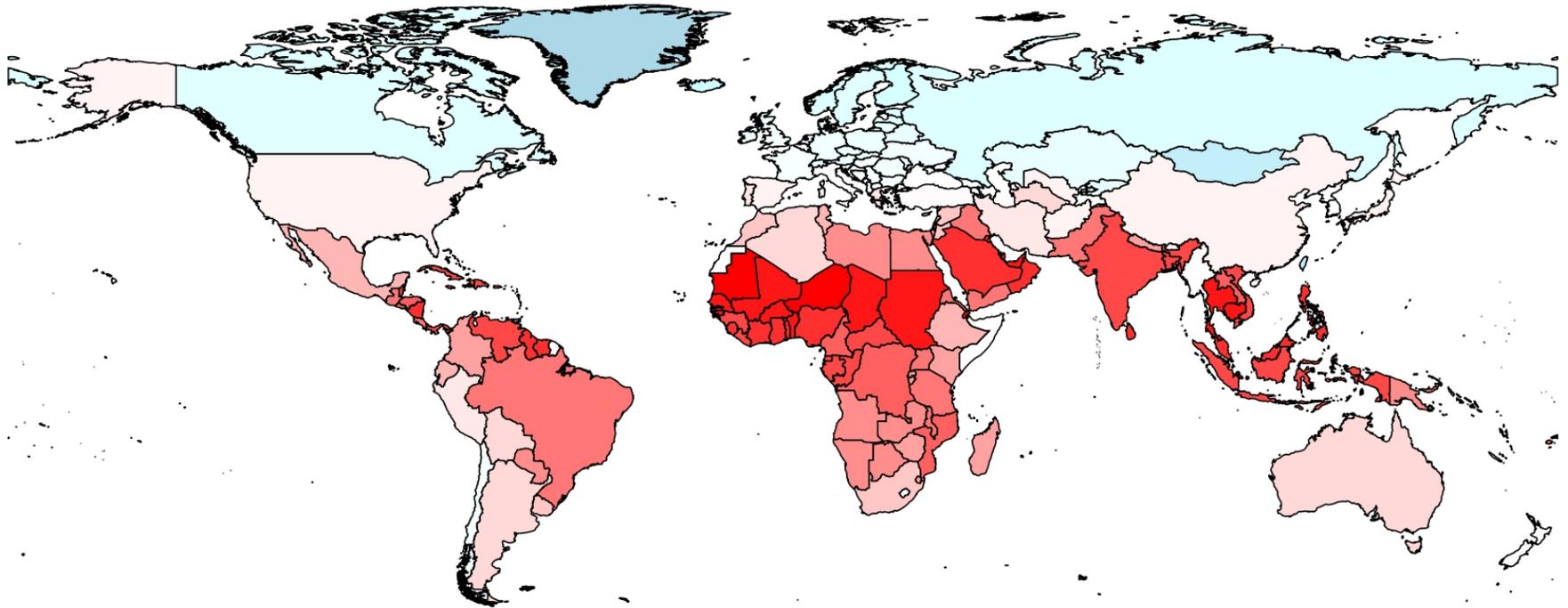


Figura 4.4: g Effetto percentuale di un riscaldamento uniforme pari ad  $1^{\circ}\text{C}$  sui tassi di crescita a livello di Paese, utilizzando la relazione globale mostrata nella Figura 4.1a. Un valore di -1 indica che un Paese che cresce al 3% annuo(-1) nel periodo di riferimento si prevede che crescerà al 2% annuo(-1) con un riscaldamento pari ad  $1^{\circ}\text{C}$ .

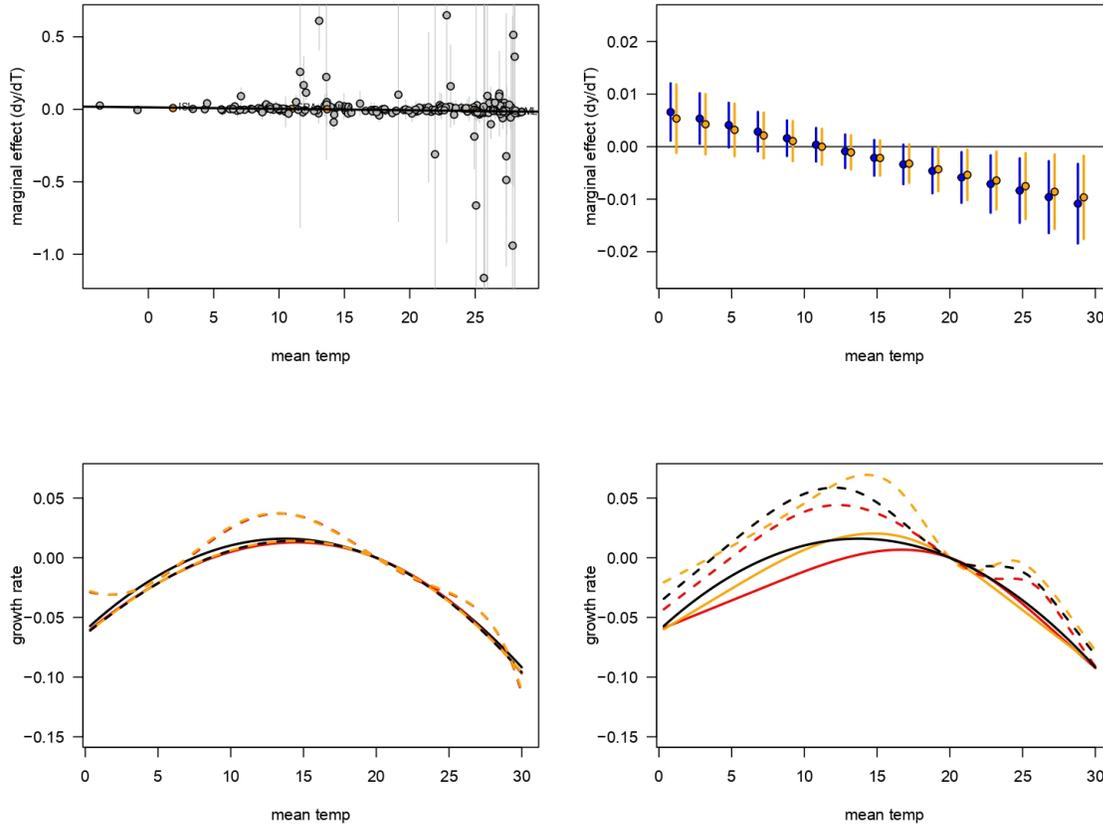


Figura 4.5: **h**, I punti rappresentano gli effetti marginali stimati per ciascun Paese da regressioni lineari separate (analogamente alle pendenze delle linee in 4.3 i Paesi Islanda, Francia ecc. si trovano alla stessa distanza), e le linee grigie l'intervallo di confidenza al 95% su ciascuno di essi. La linea nera scura traccia la derivata  $\frac{\partial Y}{\partial T}$  della funzione di risposta globale stimata nella 4.1. **i**, La non linearità globale è determinata dalle differenze di temperatura media, non dal reddito. I punti blu (stime puntuali) e le linee (intervallo di confidenza del 95%) mostrano gli effetti marginali della temperatura sulla crescita valutati a diverse temperature medie, come stimato da un modello che permette di far interagire la temperatura annuale del Paese con la temperatura media del Paese (3.3;  $\frac{\partial Y}{\partial T_{it}} = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 \cdot \bar{T}_i$ ). I punti e le linee arancioni mostrano le stime equivalenti di un modello che include un'interazione tra temperatura annuale e PIL medio  $h(T_{it}) = \beta_1 T_{it} + \beta_2 (T_{it} * \bar{T}_i) + \beta_3 (T_{it}) * \bar{Y}_i$ ). Le stime puntuali sono simili tra i due modelli, a indicare che la risposta non lineare non è semplicemente dovuta al fatto che i Paesi caldi sono mediamente più poveri. Infatti, i punti e le linee blu non contengono la componente dei Paesi poveri ( $h(T_{it}) = \beta_1 T_{it} + \beta_2 (T_{it} * \bar{T}_i)$ ). **j-k**, Forme funzionali più flessibili producono funzioni di risposta globale non lineari simili. **j**, Polinomi di ordine superiore nella temperatura, fino all'ordine 7. **k**, Spline cubiche ristrette con un massimo di 7 nodi. La linea nera continua in entrambi i grafici è la polinomiale quadratica mostrata in **a**. Mappe di base di ESRI.

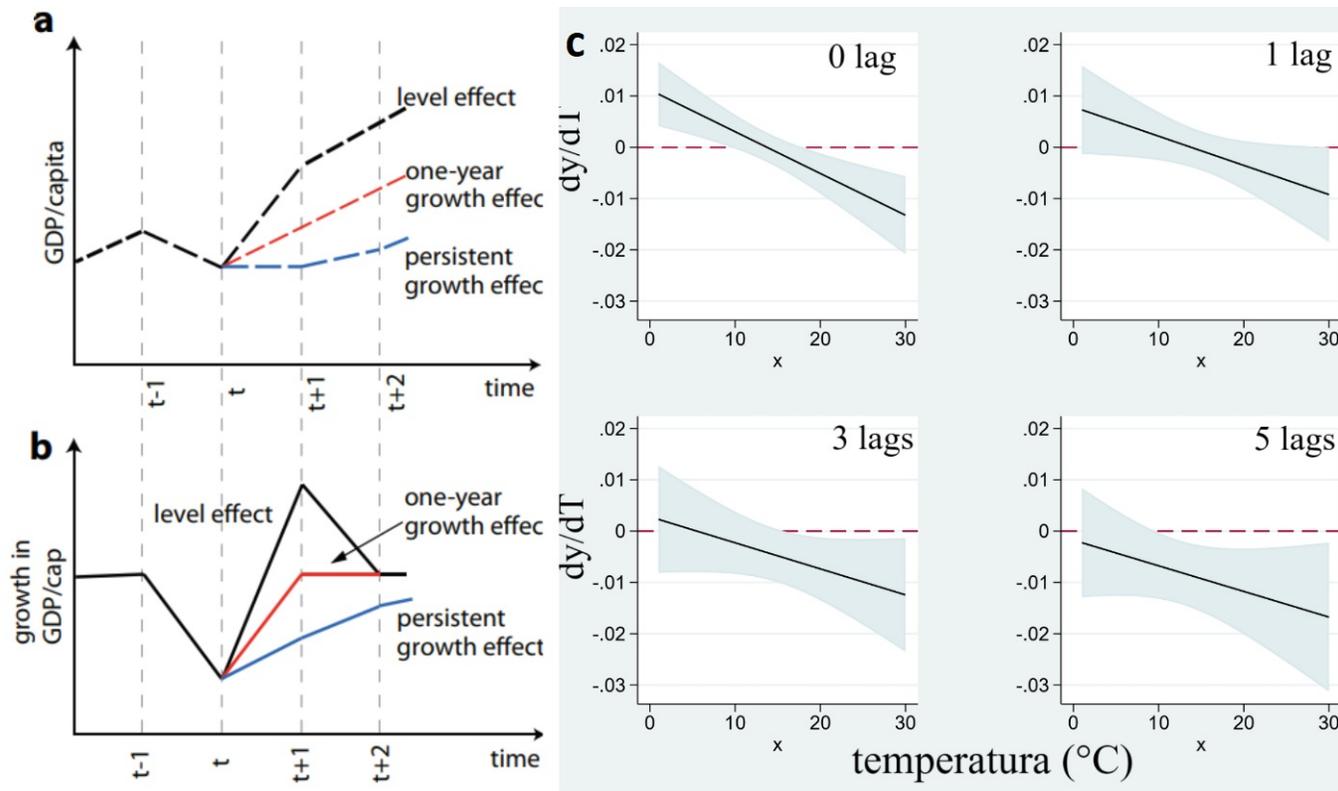


Figura 4.6: **Effetti della crescita rispetto agli effetti di livello e confronto tra risposte dei paesi ricchi e paesi poveri.** **a**, Evoluzione del PIL pro capite in seguito a uno shock termico nell'anno  $t$ . La linea nera mostra un effetto di livello, con il PIL pro capite che ritorna sulla sua traiettoria originale subito dopo lo shock. La linea rossa mostra un effetto di crescita di un anno e la linea blu un effetto di crescita pluriennale. **b**, Andamento corrispondente della crescita del PIL pro capite. Gli effetti di livello implicano un tasso di crescita più lento della media nell'anno  $t$ , ma più elevato della media in  $t+1$ . Gli effetti di crescita implicano tassi più bassi nell'anno  $t$  e poi tassi medi in seguito (per uno shock di un anno) o tassi più bassi in seguito (se uno shock di un anno ha effetti persistenti sulla crescita). **c**, Effetto marginale della temperatura sulla crescita con l'inclusione di ulteriori ritardi; la linea nera indica la somma degli effetti marginali contemporanei e ritardati a un dato livello di temperatura e le aree blu il suo intervallo di confidenza al 95%.

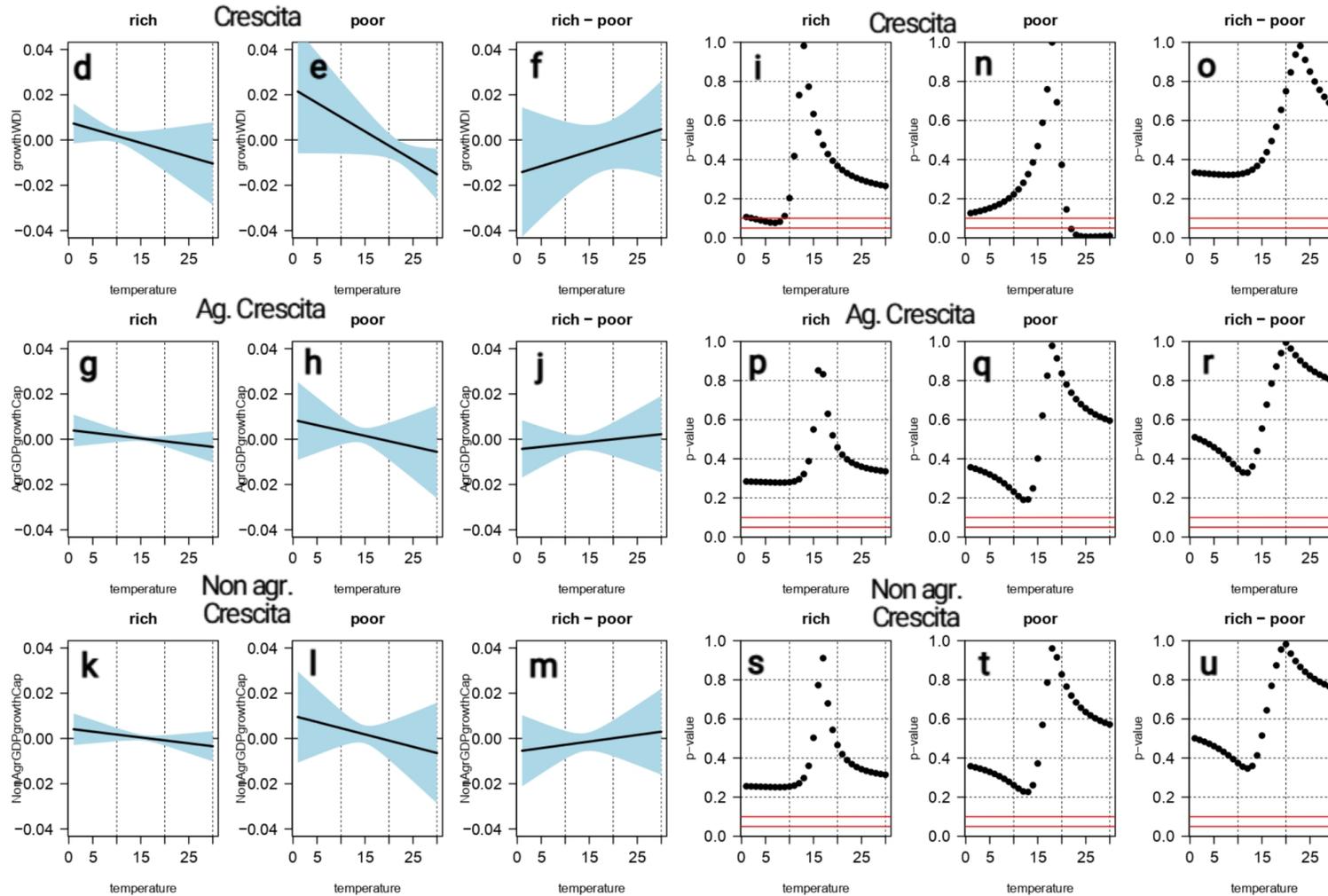


Figura 4.7: **d-l**, Verifica dell'ipotesi nulla che le pendenze delle funzioni di risposta dei paesi ricchi e poveri siano nulle o uguali tra loro, per le funzioni di risposta quadratiche mostrate nella 4.1. Le linee nere mostrano la stima puntuale dell'effetto marginale della temperatura sulla produzione dei Paesi ricchi per diverse temperature iniziali (l'ombreggiatura blu rappresenta l'intervallo di confidenza al 95%). **(d, g, j)**, l'effetto marginale della produzione dei Paesi poveri per diverse temperature iniziali **(e, h, k)** e la differenza stimata tra l'effetto marginale sulla produzione dei Paesi ricchi e dei Paesi poveri rispetto a ciascuna temperatura iniziale **(f, i, l)**. **d-f**, misura gli effetti sulla crescita pro-capite a livello economico (corrispondenti alla ??b). **g-i**, crescita agricola. **j-l**, crescita non agricola. **m-u**, valori P corrispondenti. Ogni punto rappresenta il valore P del test dell'ipotesi nulla che la pendenza della risposta dei Paesi ricchi sia nulla a una data temperatura **(m, p, s)**, che la pendenza della risposta dei Paesi poveri sia nulla **(n, q, t)**, o che le risposte dei paesi ricchi e poveri siano uguali **(o, r, u)** per la crescita complessiva, la crescita agricola o la crescita non agricola. **m-u**, Le linee rosse nella parte inferiore di ogni grafico indicano  $P = 0$ ,  $10eP = 0,05$ .

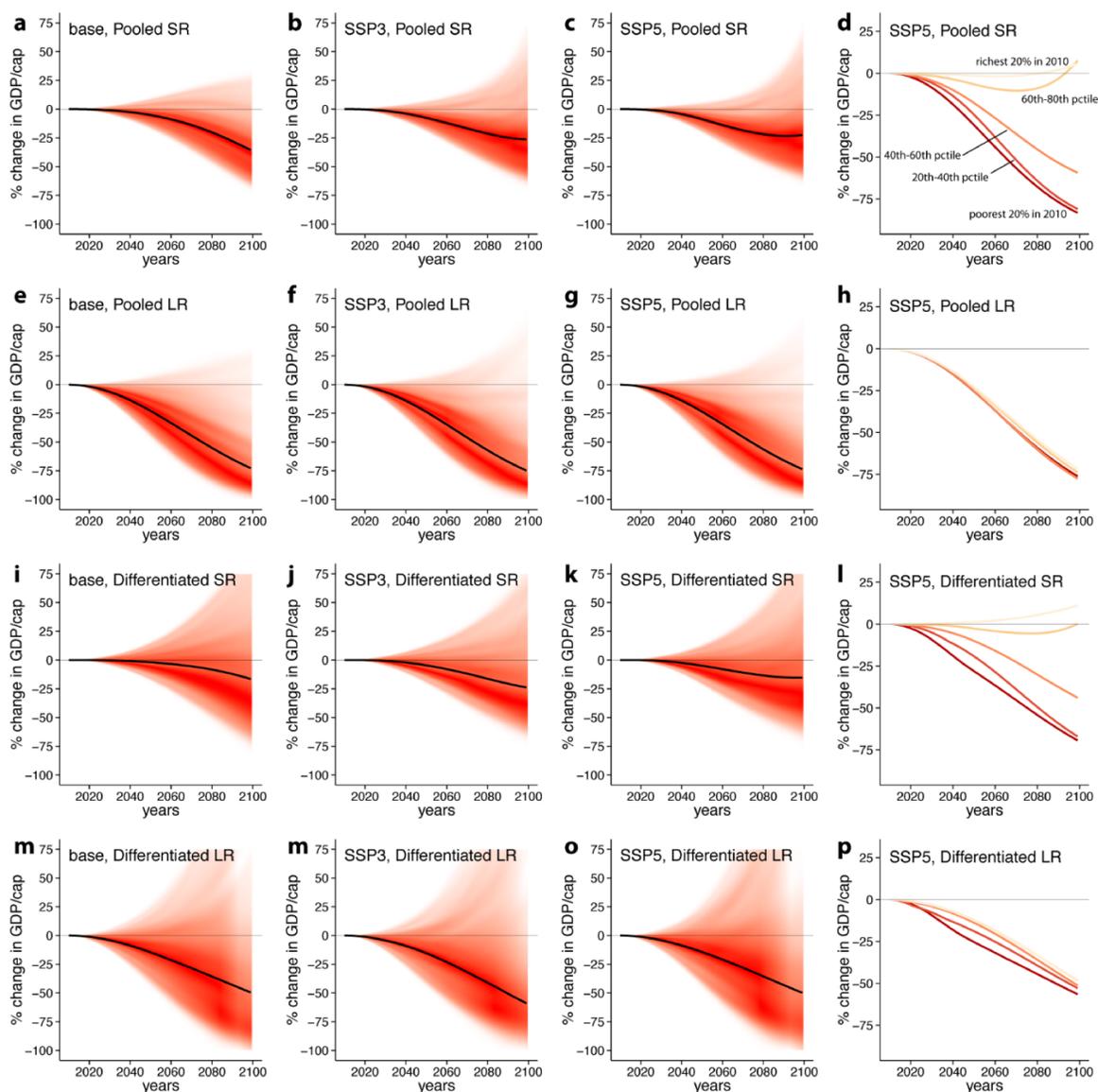


Figura 4.8: Impatto previsto dei cambiamenti climatici (RCP8.5) entro il 2100 rispetto a un mondo senza cambiamenti climatici, per diverse funzioni di risposta storiche e diversi scenari socioeconomici futuri. **a-p**, Le prime tre colonne mostrano gli impatti sul PIL pro-capite globale, per i tre diversi scenari socioeconomici sottostanti e quattro diverse funzioni di risposta. L'ultima colonna (**d, h, l, p**) mostra l'impatto sul PIL pro capite per quantile di reddito di base, per SSP5 e le diverse funzioni di risposta. I colori corrispondono ai quantili di reddito indicati in **d**. Le proiezioni di impatto aggregate a livello globale sono più sensibili alla scelta della funzione di risposta rispetto allo scenario socioeconomico proiettato, con funzioni di risposta che consentono di accumulare gli effetti della temperatura (LR) mostrano impatti globali più negativi ma una minore disuguaglianza in questi impatti.

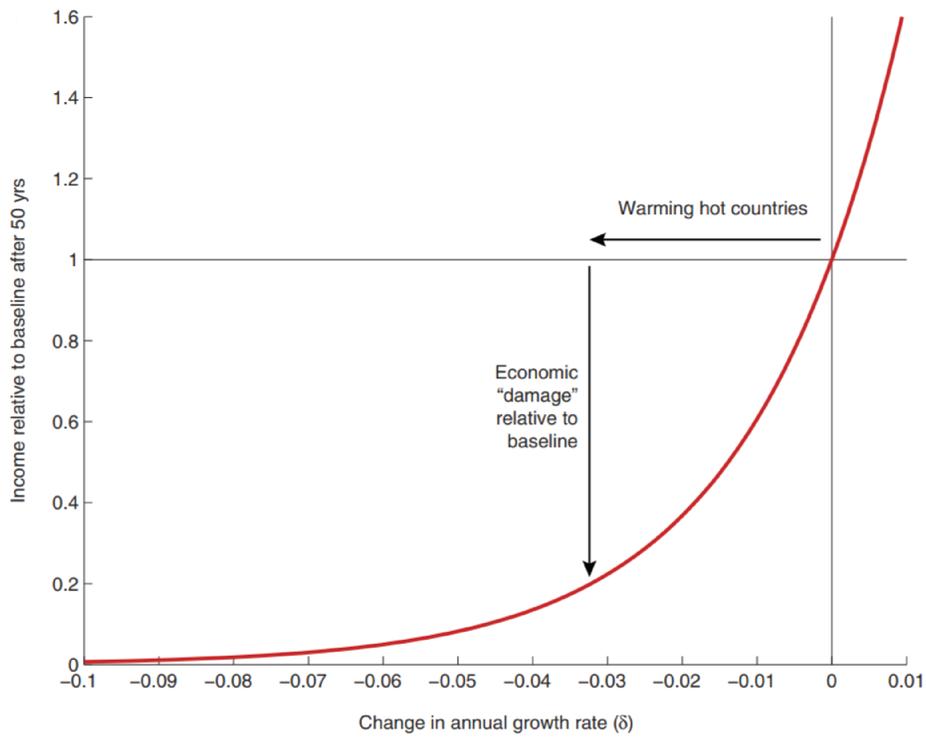


Figura 4.9: Spiegazione del perché la funzione di danno economico è concava: effetti di crescita sempre più negativi sulla crescita hanno un impatto cumulativo decrescente in termini di livelli assoluti su periodi finiti. La curva rossa è  $e^{\delta\zeta}$  dopo  $\zeta = 50\text{anni}$ .

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	Base	>20yrs	No oil	No US/China	ContYr FE	ContYr + noTrend	No YrFE	LinearTime	LDV 1lag	LDV 3lags	PWT
Temp.	0.0112*** (0.0034)	0.0116*** (0.0034)	0.0109*** (0.0031)	0.0111*** (0.0034)	0.0106*** (0.0031)	0.0079*** (0.0029)	0.0102*** (0.0036)	0.0103*** (0.0036)	0.0091** (0.0036)	0.0074** (0.0034)	0.0034 (0.0065)
Temp. sq.	-0.0004*** (0.0001)	-0.0004*** (0.0001)	-0.0004*** (0.0001)	-0.0004*** (0.0001)	-0.0004*** (0.0001)	-0.0003** (0.0001)	-0.0004*** (0.0001)	-0.0003*** (0.0001)	-0.0003*** (0.0001)	-0.0003*** (0.0001)	-0.0003 (0.0003)
Precip.	-0.0011 (0.0037)	-0.0012 (0.0038)	-0.0001 (0.0037)	-0.0012 (0.0037)	-0.0011 (0.0040)	0.0003 (0.0036)	0.0041 (0.0039)	-0.0000 (0.0038)	0.0052 (0.0037)	0.0059 (0.0037)	-0.0051 (0.0227)
Precip. sq.	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0000 (0.0000)	-0.0001** (0.0000)	-0.0001** (0.0000)	-0.0001 (0.0048)
Constant	-36.3338*** (10.7434)	-36.2543*** (10.8209)	-36.0615*** (10.9081)	-36.2333*** (10.7380)	-0.0847*** (0.0279)	-0.1030*** (0.0239)	-0.0468 (0.0416)	1.6596*** (0.1344)	-0.0364 (0.0406)	-0.0210 (0.0377)	0.1158 (0.0737)
Observations	8199	8108	7554	8079	8199	8199	8199	8199	8029	7689	8138
R squared	0.287	0.287	0.296	0.285	0.350	0.242	0.227	0.217	0.251	0.240	0.157
Optimum	13.73	13.86	13.76	13.79	13.63	15.28	13.88	14.86	13.22	12.26	5.80

Tabella 4.1: **Stime di regressione per il campione globale, stima principale e robustezza** Se non diversamente indicato, tutti i modelli includono effetti fissi per paese, effetti fissi per anno e trend temporali quadratici per paese. La temperatura è misurata in °C e le precipitazioni in metri. Colonne: (1) specificazione principale, (2) come nella colonna 1 ma escludendo i Paesi con meno di 20 anni di dati sulla crescita, (3) come nella colonna 1 ma escludendo i grandi Paesi esportatori di petrolio, (4) come nella colonna 1 ma escludendo gli Stati Uniti e la Cina, (5) come nella colonna 1 ma con l'aggiunta di effetti fissi per continente/anno, (6) come nella colonna 1 ma con l'aggiunta di effetti fissi per continente/anno e l'eliminazione dei trend temporali dei Paesi, (7) come nella colonna 1 ma eliminando gli effetti fissi dell'anno, (8) come nella colonna 1 ma solo trend temporali lineari, (9-10) come nella colonna 1 ma aggiungendo 1 o 3 lag della crescita pro capite (cioè, lag della variabile dipendente), (11) come nella colonna 1 ma utilizzando i dati di crescita di Penn World Tables. Gli asterischi indicano la significatività statistica ai livelli dell'1% (\*\*\*), del 5% (\*\*) e del 10% (\*).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Base	poor-yr FE	>20Yrs	>20Yrs+poor-yr FE	ContYr FE	ContYr + noTrend
Temperature ( $\beta_1$ )	0.0079 (0.0049)	0.0047 (0.0052)	0.0079 (0.0049)	0.0047 (0.0052)	0.0072 (0.0051)	0.0139** (0.0066)
Temperature sq. ( $\beta_2$ )	-0.0003 (0.0002)	-0.0002 (0.0002)	-0.0003 (0.0002)	-0.0002 (0.0002)	-0.0003 (0.0002)	-0.0006** (0.0003)
Temperature * poor ( $\beta_3$ )	0.0148 (0.0153)	0.0183 (0.0151)	0.0169 (0.0156)	0.0203 (0.0153)	0.0090 (0.0124)	-0.0083 (0.0123)
Temperature sq * poor ( $\beta_4$ )	-0.0003 (0.0004)	-0.0004 (0.0004)	-0.0004 (0.0004)	-0.0005 (0.0004)	-0.0002 (0.0003)	0.0005 (0.0004)
Observations	8021	8021	7930	7930	8021	8021
R squared	0.291	0.303	0.290	0.303	0.357	0.249
$\beta_1 + \beta_3$	0.0227	0.0230	0.0248	0.0250	0.0162	0.0056
se( $\beta_1 + \beta_3$ )	0.0177	0.0180	0.0188	0.0190	0.0119	0.0118
$\beta_2 + \beta_4$	-0.0005	-0.0005	-0.0006	-0.0004	-0.0003	-0.0003
se( $\beta_2 + \beta_4$ )	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002
Rich-country optimum (C)	14.7	13.0	13.8	13.6	19.9	16.2
Poor-country optimum (C)	17.1	18.2	18.6	19.1	16.8	21.5

Tabella 4.2: **Confronto gli effetti della temperatura sulla crescita pro capite nei paesi ricchi rispetto a quelli poveri** Se non diversamente indicato, tutti i modelli includono una quadratica nelle precipitazioni, effetti fissi paese, effetti fissi per anno e trend temporali quadratici per paese. La temperatura è misurata in °C. Colonne: (1) specificazione principale con le variabili climatiche interagite con un indicatore che indica se un paese è povero, (2) come nella colonna 1 ma permettendo agli effetti fissi dell'anno di differire tra paesi ricchi e poveri, (3) come nella colonna 1 ma restringendo il campione ai paesi con almeno 20 osservazioni, (4) come nella colonna 1, ma restringendo il campione ai Paesi con almeno 20 osservazioni e consentendo agli effetti fissi dell'anno di differire tra Paesi ricchi e poveri, (5) come nella colonna 1, ma aggiungendo gli effetti fissi del continente per anno, (6) come nella colonna 1, ma aggiungendo gli effetti fissi del continente per anno ed eliminando i trend temporali dei Paesi (come in [Hsiang, 2010c]). Gli effetti lineari e quadratici stimati nei Paesi poveri (e i loro errori standard) sono riportati nelle righe inferiori della tabella, insieme agli ottimali di temperatura stimati per i Paesi ricchi e per quelli poveri. Gli asterischi indicano la significatività statistica a livello di 1% (\*\*\*), 5% (\*\*) e 10% (\*).

Tabella 4.3: Le stime si basano su quattro diverse funzioni di risposta (Capitolo 4) che stimano la risposta della crescita alla temperatura su tre diversi scenari di evoluzione delle popolazioni e dei redditi futuri in assenza di cambiamenti climatici. La colonna di sinistra indica la funzione di risposta storica su cui si basano le proiezioni, la seconda colonna descrive la statistica riportata (la stima puntuale, un determinato percentile nella distribuzione bootstrap delle proiezioni, o la percentuale di esecuzioni totali che prevedono impatti più negativi di zero, -10% o -20%), e le ultime tre colonne indicano gli impatti percentuali per tre diversi scenari futuri: "base" (proiezioni demografiche delle Nazioni Unite con variante media, tassi di crescita futuri senza cambiamenti climatici pari ai tassi medi nazionali osservati nel periodo 1980-2020), SSP3 e SSP5.

model	estimate	baseline growth	SSP3	SSP5
Pooled model	point est.	-35	-22	-20
	5th	-62	-58	-56
	25th	-48	-39	-35
	50th	-31	-24	-19
	75th	-9	-5	2
	95th	19	54	58
	% runs < 0	83	71	69
	% runs < -10	69	62	58
	% runs < -20	65	51	47
Pooled with 5 lags	point est.	-76	-76	-75
	5th	-89	-89	-89
	25th	-82	-82	-82
	50th	-75	-71	-71
	75th	-66	-61	-61
	95th	22	46	44
	% runs < 0	100	91	91
	% runs < -10	95	90	91
	% runs < -20	93	88	87
Rich/poor model	point est.	-21	-28	-19
	5th	-60	-54	-52
	25th	-38	-36	-32
	50th	-20	-19	-15
	75th	18	15	22
	95th	91	74	81
	% runs < 0	70	75	69
	% runs < -10	61	66	58
	% runs < -20	50	52	47
Rich/poor with 5 lags	point est.	-61	-54	-50
	5th	-92	-90	-92
	25th	-83	-73	-78
	50th	-53	-49	-42
	75th	16	38	51
	95th	245	339	401
	% runs < 0	75	69	64
	% runs < -10	71	69	64
	% runs < -20	69	67	63

## 5. Conclusioni

I cambiamenti climatici ci sono sempre stati, nella storia del Pianeta. Ma il riscaldamento climatico a cui assistiamo da circa 150 anni è anomalo perché innescato dall'uomo e dalle sue attività. Da circa 15 anni i dati prodotti da migliaia di scienziati in tutto il mondo, analizzati e sistematizzati dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)<sup>1</sup>, concordano nel dichiarare che il *global warming* deriva dall'effetto serra antropico, cioè innescato dalle attività dell'uomo.

Proprio per l'importanza del tema ho deciso di trattarlo all'interno di questo elaborato, cercando di fornire ulteriori motivazioni sul perché sarebbe più saggio iniziare a sviluppare nuove idee e soluzioni comuni per il controllo ormai irreversibile del cambiamento climatico. Per far sì che il problema tocchi la maggior parte delle persone, ho deciso di analizzare la forza dell'influenza dell'innalzamento della temperatura sull'economia. Così da sensibilizzare anche coloro che credono che un leggero aumento delle temperature non porti ad altro che a conseguenze ambientali come lo scioglimento dei ghiacci o l'innalzamento dei mari.

Per cercare di svolgere un'analisi completa, ho cercato sempre di escludere particolari condizioni che potessero compromettere i vari output ottenuti. Effettuando dunque tutte le possibili considerazioni e analizzando tutti i possibili scenari, in modo da non supportare eventuali tesi che omettono queste condizioni.

La robustezza dei modelli futuri è comunque certificabile dal fatto che la maggior parte dei dati utilizzati sono preventivamente stimati da Enti autorevoli che sviluppano previsioni costanti su temperatura, precipitazioni e cambiamenti economici e demografici dei Paesi.

Importantissimo è l'adattamento della produzione economica alla temperatura, dove scopriamo che, se a contatto con determinate temperature, assume un aspetto non lineare, concavo e con un punto di *optimun* pari a 14°C.

In questo senso, più sconcertante è il fatto che i Paesi poveri partono da una situazione di svantaggio nel quale è possibile osservare una peggior risposta dell'economia a temperature ancora più elevate. Anche per quanto concerne i Paesi ricchi però la situazione non migliora, abbiamo visto infatti che sebbene la stima dell'effetto totale delle

---

<sup>1</sup>[IPCC, 2018]

alte temperature sui Paesi ricchi sia sostanzialmente meno certa perché nel campione ci sono pochi Paesi ricchi e caldi, la loro risposta è quasi uguale a quella dei Paesi poveri.

Questo suggerisce che l'adattamento al cambiamento climatico potrebbe essere più difficile di quanto ritenuto in precedenza e che l'accumulo di ricchezza, tecnologia ed esperienza potrebbe non mitigare le perdite economiche globali nel corso di questo secolo. Queste risposte le abbiamo riscontrate anche in riferimento al PIL agricolo.

Osservando invece l'analisi futura, nel 2100, secondo le nostre stime, il cambiamento climatico non mitigato renderà il 77% dei Paesi più poveri in termini pro capite rispetto a quelli che sarebbero senza il cambiamento climatico.

Il cambiamento climatico potrebbe rendere alcuni Paesi più poveri in futuro di quanto non lo siano oggi, a seconda dei tassi di crescita secolari ipotizzati. Con una crescita di base elevata e un cambiamento climatico non mitigato (RCP8.5 e Shared Socio-economic Pathway (SSP)), si prevede che nel 2100 il 5% dei Paesi sarà più povero di oggi, mentre con una crescita bassa lo sarà il 43% (SSP3). Le differenze nell'impatto previsto del riscaldamento sono principalmente funzioni delle temperature di base dei Paesi, poiché il riscaldamento aumenta la produttività nei Paesi freddi.

In particolare, l'Europa potrebbe beneficiare dell'aumento delle temperature medie. Poiché il riscaldamento danneggia la produttività nei Paesi con temperature medie elevate, si prevede che i redditi delle regioni povere diminuiranno rispetto a un mondo senza cambiamenti climatici con un'elevata confidenza ( $P < 0,01$ ), indipendentemente dall'approccio statistico utilizzato.

Se l'adattamento futuro imiterà quello passato, si prevede che un riscaldamento non mitigato rimodellerà l'economia globale, riducendo il reddito medio mondiale di circa il 23% entro il 2100 e aumentando la disuguaglianza di reddito globale, rispetto agli scenari senza cambiamenti climatici. A differenza delle stime precedenti, le perdite globali previste sono approssimativamente lineari rispetto alla temperatura media globale, con perdite mediane molto più grandi di quanto indicato dai principali modelli.

Se le società continueranno a funzionare come nel recente passato, si prevede che il cambiamento climatico rimodellerà l'economia globale, riducendo sostanzialmente la produzione economica mondiale ed eventualmente amplificando le disuguaglianze economiche esistenti a livello globale, rispetto a un mondo senza cambiamenti climatici.

Adattamenti come innovazioni senza precedenti o investimenti difensivi potrebbero ridurre questi effetti, ma i conflitti sociali o le interruzioni del commercio - dovute a

restrizioni politiche o a perdite correlate in tutto il mondo - potrebbero aggravare la situazione.

Per quanto concerne l'elaborato, a fronte di queste considerazioni e tenendo conto dello sviluppo del Database utilizzato, che contiene milioni di osservazioni, ritengo che il lavoro svolto sia comunque soddisfacente e da tenere in considerazione per sviluppi futuri.

Qualora si volessero sviluppare ulteriori modelli e analisi, si potrebbero adottare dei modelli di regressione più complessi rispetto a quelli utilizzati all'interno dell'elaborato. In secondo luogo, potrebbe essere interessante tenere in considerazione ulteriori serie storiche, come i dati che prendono in considerazione l'innalzamento dei mari, oppure shock improvvisi come cicloni, terremoti o eruzioni vulcaniche.

## Appendice - Script utilizzati

```
foreach var of loc vars {
qui reg `var' temp temp2 temp2poor prec prec2 precpoor prec2poor _yi* _y2* i.year i.iso_id if poorWDIppp<., cl(iso_id)
gen `var'_br=.
gen `var'_bp=.
gen `var'_bc=.
gen `var'_ser=.
gen `var'_sep=.
gen `var'_sec=.
gen `var'_pr=.
gen `var'_pp=.
gen `var'_pc=.
forvalues t = 1/30 {
qui lincom (temp + 2*temp2*t') // test rich country marginal effect
qui replace `var'_br = r(estimate) in `t'
qui replace `var'_ser = r(se) in `t'
qui replace `var'_pr = 2*ttail(e(df_r),abs(r(estimate)/r(se))) in `t' //pvalue
qui lincom (temp + temp2poor + 2*temp2*t' + 2*temp2poor*t') // test poor country marginal effect
qui replace `var'_bp = r(estimate) in `t'
qui replace `var'_sep = r(se) in `t'
qui replace `var'_pp = 2*ttail(e(df_r),abs(r(estimate)/r(se))) in `t' //pvalue
qui lincom -(temp2poor + 2*temp2poor*t') //difference in slopes: rich minus poor
qui replace `var'_bc = r(estimate) in `t'
qui replace `var'_sec = r(se) in `t'
qui replace `var'_pc = 2*ttail(e(df_r),abs(r(estimate)/r(se))) in `t' //pvalue
}
}
di "`var'"
}
```

Figura 5.1: Script Figura 4.7.

```
|foreach j of loc vals {
cap drop cilo cihhi
qui reg growthWDI L(0/'j').(temp temp2 UDeI_precip_popweight UDeI_precip_popweight_2) i.year _yi* _y2* i.iso_id, cl(iso_id)
mat b = e(b)
gen Y`j'est=.
gen Y`j'se=.
forvalues i = 1/30 {
if `j'==0 {
qui lincom temp + 2*i*temp2
}
if `j'==1 {
qui lincom temp + L.temp + 2*i*(temp2 + L.temp2)
}
if `j'==3 {
qui lincom temp + L.temp + L2.temp + L3.temp + 2*i*(temp2 + L.temp2 + L2.temp2 + L3.temp2)
}
if `j'==5 {
qui lincom temp + L.temp + L2.temp + L3.temp + L4.temp + L5.temp + 2*i*(temp2 + L.temp2 + L2.temp2 + L3.temp2 + L4.temp2 + L5.temp2)
}
qui replace Y`j'est= r(estimate) in `i'
qui replace Y`j'se= r(se) in `i'
}
gen cilo = Y`j'est - 1.96*Y`j'se
gen cihhi = Y`j'est + 1.96*Y`j'se
tw (rarea cilo cihhi x, color(bluishgray) legend(off) ylabel(,angle(horizontal))) ///
(line Y`j'est x , lc(black) yline(0, lp(dash)) saving($plots\g`j'.gph, replace))
post lags (`j') (b[1,1]) (b[1,2]) (b[1,3]) (b[1,4]) (b[1,5]) (b[1,6]) (b[1,7]) (b[1,8]) (b[1,9]) (b[1,10]) (b[1,11]) (b[1,12])
// going to be saving stuff that we don't need for lag<5, but easiest way to do it
}
```

Figura 5.2: Script Figura 4.1c.

```

reg growthWDI temp temp2 precip precip2 i.year _yi* _y2* i.iso_id , cluster(iso_id) //full sample
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg growthWDI temp temp2 precip precip2 i.year _yi* _y2* i.iso_id if wdinomiss>=20, cluster(iso_id) //drop countries with <20 obs
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg growthWDI temp temp2 precip precip2 i.year _yi* _y2* i.iso_id if oil==0, cluster(iso_id) //Drop oil countries
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg growthWDI temp temp2 precip precip2 i.year _yi* _y2* i.iso_id if iso~="USA" & iso~="CHN", cluster(iso_id) //drop US and China
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
xi i.year*i.continent, pref(_cy_) //make continent-yr FE
reg growthWDI temp temp2 precip precip2 _cy* _yi* _y2* i.iso_id , cluster(iso_id) //add continent year FE
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg growthWDI temp temp2 precip precip2 _cy* i.iso_id , cluster(iso_id) //continent-year FE and no time trends
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg growthWDI temp temp2 precip precip2 _yi* _y2* i.iso_id, cluster(iso_id) // no year FE
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg growthWDI temp temp2 precip precip2 i.year _yi* i.iso_id, cluster(iso_id) //linear time trends
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg growthWDI L.growthWDI temp temp2 precip precip2 _yi* _y2* i.iso_id , cluster(iso_id) // one lag of growth
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg growthWDI L(1/3).growthWDI temp temp2 precip precip2 _yi* _y2* i.iso_id , cluster(iso_id) //3 lags of growth
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])
loc j = `j` + 1
reg rgdpCAPgr temp temp2 precip precip2 _yi* _y2* i.iso_id , cluster(iso_id) //Penn World Tables data
est sto reg`j`
estadd sca opt = _b[temp]/-2/_b[temp2]
post robust (`j`) (_b[temp]) (_b[temp2])

```

Figura 5.3: Script Tabella 4.

## 6. Ringraziamenti

In questa pagina desidero ringraziare le persone a me più care alle quali questo lavoro è dedicato.

Innanzitutto ringrazio sinceramente il coordinatore del corso, il Professore Brenna Claudio, per la grande disponibilità e cortesia prestata durante la stesura della tesi e durante tutto il mio percorso accademico.

I ringraziamenti più grandi vanno alla mia famiglia, a mia mamma Giusy e a mio fratello Christian, che mi hanno permesso di completare questo ciclo di studi e di raggiungere questo traguardo.

Un ringraziamento speciale alla mia ragazza Chiara che mi ha sempre sostenuto, soprattutto nei momenti difficili, e che mi è sempre stata vicino permettendomi di raggiungere questo traguardo con la giusta serenità e spensieratezza.

Un ringraziamento speciale va anche ai miei fedelissimi Colleghi, Enrico Lombard e Andrea Carpentieri, con il quale ho condiviso momenti speciali che ci hanno permesso di affrontare questi 5 anni nel migliore dei modi: con allegria e dedizione.

Infine ringrazio, me stesso per la determinazione e l'impegno dimostrato, per averci provato ed esserci riuscito.

## Bibliografia

- [Angrist and Pischke, 2009] Angrist, J. D. and Pischke, J.-S. (2009). *Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion*. Princeton university press.
- [Anttila-Hughes and Hsiang, 2013] Anttila-Hughes, J. and Hsiang, S. (2013). Destruction, disinvestment, and death: Economic and human losses following environmental disaster. *Available at SSRN 2220501*.
- [Arias et al., 2021] Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M., Plattner, G.-K., Rogelj, J., et al. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change; technical summary.
- [Auffhammer et al., 2020] Auffhammer, M., Hsiang, S. M., Schlenker, W., and Sobel, A. (2020). Using weather data and climate model output in economic analyses of climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*.
- [Barro and Sala-i Martin, 2003] Barro, R. J. and Sala-i Martin, X. I. (2003). *Economic growth*. MIT press.
- [Bertrand et al., 2004] Bertrand, M., Duflo, E., and Mullainathan, S. (2004). How much should we trust differences-in-differences estimates? *The Quarterly journal of economics*, 119(1):249–275.
- [Burke and Emerick, 2016] Burke, M. and Emerick, K. (2016). Adaptation to climate change: Evidence from us agriculture. *American Economic Journal: Economic Policy*, 8(3):106–40.
- [Burke et al., 2014] Burke, M., Hsiang, S. M., and Miguel, E. (2014). Climate and conflict.
- [Burke et al., 2015] Burke, M., Hsiang, S. M., and Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527(7577):235–239.

- [Cerra and Saxena, 2008] Cerra, V. and Saxena, S. C. (2008). Growth dynamics: the myth of economic recovery. *American Economic Review*, 98(1):439–57.
- [Chakrabarty, 2021] Chakrabarty, D. (2021). *La sfida del cambiamento climatico: globalizzazione e antropocene*. Ombre corte.
- [Davis, 1989] Davis, J. B. (1989). Keynes on atomism and organicism. *The Economic Journal*, 99(398):1159–1172.
- [Deaton, 1989] Deaton, A. (1989). Saving in developing countries: Theory and review. *The World Bank Economic Review*, 3(suppl\_1):61–96.
- [Dell et al., 2009] Dell, M., Jones, B. F., and Olken, B. A. (2009). Temperature and income: reconciling new cross-sectional and panel estimates. *American Economic Review*, 99(2):198–204.
- [Dell et al., 2012a] Dell, M., Jones, B. F., and Olken, B. A. (2012a). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3):66–95.
- [Dell et al., 2012b] Dell, M., Jones, B. F., and Olken, B. A. (2012b). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3):66–95.
- [Dell et al., 2012c] Dell, M., Jones, B. F., and Olken, B. A. (2012c). Temperature shocks and economic growth: Evidence from the last half century. *American Economic Journal: Macroeconomics*, 4(3):66–95.
- [Dell et al., 2014a] Dell, M., Jones, B. F., and Olken, B. A. (2014a). What do we learn from the weather? the new climate-economy literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3):740–98.
- [Dell et al., 2014b] Dell, M., Jones, B. F., and Olken, B. A. (2014b). What do we learn from the weather? the new climate-economy literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3):740–98.
- [Deryugina and Hsiang, 2014a] Deryugina, T. and Hsiang, S. M. (2014a). Does the environment still matter? daily temperature and income in the united states. Technical report, National Bureau of Economic Research.

- [Deryugina and Hsiang, 2014b] Deryugina, T. and Hsiang, S. M. (2014b). Does the environment still matter? daily temperature and income in the united states. Technical report, National Bureau of Economic Research.
- [Deschênes and Greenstone, 2011] Deschênes, O. and Greenstone, M. (2011). Climate change, mortality, and adaptation: Evidence from annual fluctuations in weather in the us. *American Economic Journal: Applied Economics*, 3(4):152–85.
- [Doxsey-Whitfield et al., 2015] Doxsey-Whitfield, E., MacManus, K., Adamo, S. B., Pistolesi, L., Squires, J., Borkovska, O., and Baptista, S. R. (2015). Taking advantage of the improved availability of census data: a first look at the gridded population of the world, version 4. *Papers in Applied Geography*, 1(3):226–234.
- [Feenstra et al., 2015a] Feenstra, R. C., Inklaar, R., and Timmer, M. P. (2015a). The next generation of the penn world table. *American Economic Review*, 105(10):3150–3182.
- [Feenstra et al., 2015b] Feenstra, R. C., Inklaar, R., and Timmer, M. P. (2015b). The next generation of the penn world table. *American economic review*, 105(10):3150–82.
- [Fisher, 1969] Fisher, F. M. (1969). The existence of aggregate production functions. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pages 553–577.
- [Fragkias et al., 2013] Fragkias, M., Güneralp, B., Seto, K. C., and Goodness, J. (2013). A synthesis of global urbanization projections. *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities*, pages 409–435.
- [Georgieva, 2020] Georgieva, K. (2020). *IMF Managing Director Kristalina Georgieva’s Statement Following a G20 Ministerial Call on the Coronavirus Emergency*.
- [Graff Zivin et al., 2018] Graff Zivin, J., Hsiang, S. M., and Neidell, M. (2018). Temperature and human capital in the short and long run. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(1):77–105.
- [Graff Zivin and Neidell, 2014a] Graff Zivin, J. and Neidell, M. (2014a). Temperature and the allocation of time: Implications for climate change. *Journal of Labor Economics*, 32(1):1–26.

- [Graff Zivin and Neidell, 2014b] Graff Zivin, J. and Neidell, M. (2014b). Temperature and the allocation of time: Implications for climate change. *Journal of Labor Economics*, 32(1):1–26.
- [Granger and Newbold, 1974] Granger, C. W. and Newbold, P. (1974). Spurious regressions in econometrics. *Journal of econometrics*, 2(2):111–120.
- [Greene and Hensher, 2003] Greene, W. H. and Hensher, D. A. (2003). A latent class model for discrete choice analysis: contrasts with mixed logit. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(8):681–698.
- [Heal and Park, 2013a] Heal, G. and Park, J. (2013a). Feeling the heat: Temperature, physiology & the wealth of nations. Technical report, National Bureau of Economic Research.
- [Heal and Park, 2013b] Heal, G. and Park, J. (2013b). Feeling the heat: Temperature, physiology & the wealth of nations. Technical report, National Bureau of Economic Research.
- [Hsiang, 2016] Hsiang, S. (2016). Climate econometrics. *Annual Review of Resource Economics*, 8:43–75.
- [Hsiang, 2010a] Hsiang, S. M. (2010a). Temperatures and cyclones strongly associated with economic production in the caribbean and central america. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(35):15367–15372.
- [Hsiang, 2010b] Hsiang, S. M. (2010b). Temperatures and cyclones strongly associated with economic production in the caribbean and central america. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 107(35):15367–15372.
- [Hsiang, 2010c] Hsiang, S. M. (2010c). Temperatures and cyclones strongly associated with economic production in the caribbean and central america. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 107(35):15367–15372.
- [Hsiang et al., 2013a] Hsiang, S. M., Burke, M., and Miguel, E. (2013a). Quantifying the influence of climate on human conflict. *Science*, 341(6151):1235367.
- [Hsiang et al., 2013b] Hsiang, S. M., Burke, M., and Miguel, E. (2013b). Quantifying the influence of climate on human conflict. *Science*, 341(6151):1235367.

- [Hsiang and Jina, 2014a] Hsiang, S. M. and Jina, A. S. (2014a). The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth: Evidence from 6,700 cyclones. Technical report, National Bureau of Economic Research.
- [Hsiang and Jina, 2014b] Hsiang, S. M. and Jina, A. S. (2014b). The causal effect of environmental catastrophe on long-run economic growth: Evidence from 6,700 cyclones. Technical report, National Bureau of Economic Research.
- [Hsiang and Jina, 2015] Hsiang, S. M. and Jina, A. S. (2015). Geography, depreciation, and growth. *American Economic Review*, 105(5):252–56.
- [Hsiang and Meng, 2014] Hsiang, S. M. and Meng, K. C. (2014). Reconciling disagreement over climate–conflict results in africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(6):2100–2103.
- [Hsiang et al., 2011] Hsiang, S. M., Meng, K. C., and Cane, M. A. (2011). Civil conflicts are associated with the global climate. *Nature*, 476(7361):438–441.
- [Hulme and Mahony, 2010] Hulme, M. and Mahony, M. (2010). Climate change: What do we know about the ipcc? *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 34(5):705–718.
- [Information et al., 2012] Information, W. B., Technologies, C., and infoDev (Program) (2012). *Information and communications for development 2012: Maximizing mobile*. World Bank Publications.
- [IPCC, 2018] IPCC, I. S. (2018). Ipcc special report.
- [Masseti et al., 2014] Massetti, E., Mendelsohn, R. O., and Chonabayashi, S. (2014). Using degree days to value farmland. *Available at SSRN 2550177*.
- [Matsuura and Willmott, 2012] Matsuura, K. and Willmott, C. J. (2012). Terrestrial air temperature: 1900–2010 gridded monthly time series. *University of Delaware*.
- [McIntosh and Schlenker, 2006] McIntosh, C. T. and Schlenker, W. (2006). Identifying non-linearities in fixed effects models. *UC-San Diego Working Paper*.
- [Montesano, 2011] Montesano, A. (2011). Capitale, funzione aggregata di produzione e coerenza dell’analisi neoclassica. In *Gli economisti postkeynesiani di Cambridge e l’Italia*. Accademia Nazionale dei Lincei Scienze e Lettere.

- [Moore and Diaz, 2015] Moore, F. C. and Diaz, D. B. (2015). Temperature impacts on economic growth warrant stringent mitigation policy. *Nature Climate Change*, 5(2):127–131.
- [Müller et al., 2011] Müller, C., Cramer, W., Hare, W. L., and Lotze-Campen, H. (2011). Climate change risks for african agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(11):4313–4315.
- [Nordhaus, 1994] Nordhaus, W. D. (1994). *Managing the global commons: the economics of climate change*, volume 31. MIT press Cambridge, MA.
- [Nordhaus, 2008] Nordhaus, W. D. (2008). *A question of balance*. Yale University Press.
- [Nordhaus and Boyer, 2003] Nordhaus, W. D. and Boyer, J. (2003). *Warming the world: economic models of global warming*. MIT press.
- [O’Neill et al., 2014] O’Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., and van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic change*, 122(3):387–400.
- [Pindyck, 2013] Pindyck, R. S. (2013). Climate change policy: what do the models tell us? *Journal of Economic Literature*, 51(3):860–72.
- [Revesz et al., 2014] Revesz, R. L., Howard, P. H., Arrow, K., Goulder, L. H., Kopp, R. E., Livermore, M. A., Oppenheimer, M., and Sterner, T. (2014). Global warming: Improve economic models of climate change. *Nature*, 508(7495):173–175.
- [Romer and Romer, 2010] Romer, C. D. and Romer, D. H. (2010). The macroeconomic effects of tax changes: estimates based on a new measure of fiscal shocks. *American Economic Review*, 100(3):763–801.
- [Schlenker et al., 2006] Schlenker, W., Hanemann, W. M., and Fisher, A. C. (2006). The impact of global warming on us agriculture: an econometric analysis of optimal growing conditions. *Review of Economics and statistics*, 88(1):113–125.
- [Schlenker and Lobell, 2010] Schlenker, W. and Lobell, D. B. (2010). Robust negative impacts of climate change on african agriculture. *Environmental Research Letters*, 5(1):014010.

- [Schlenker and Roberts, 2009a] Schlenker, W. and Roberts, M. J. (2009a). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to u.s. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37):15594–15598.
- [Schlenker and Roberts, 2009b] Schlenker, W. and Roberts, M. J. (2009b). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to us crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 106(37):15594–15598.
- [Schlenker and Roberts, 2009c] Schlenker, W. and Roberts, M. J. (2009c). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to us crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of sciences*, 106(37):15594–15598.
- [Solow, 1956] Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The quarterly journal of economics*, 70(1):65–94.
- [Solow, 1957] Solow, R. M. (1957). Technical change and the aggregate production function. *The review of Economics and Statistics*, pages 312–320.
- [Stavins, 2019] Stavins, R. N. (2019). *Economics of the environment: selected readings*. Edward Elgar Publishing.
- [Stern, 2006] Stern, N. (2006). Stern review: The economics of climate change.
- [Stern and Stern, 2007] Stern, N. and Stern, N. H. (2007). *The economics of climate change: the Stern review*. cambridge University press.
- [Summers and Heston, 1991] Summers, R. and Heston, A. (1991). The penn world table (mark 5): an expanded set of international comparisons, 1950–1988. *The Quarterly Journal of Economics*, 106(2):327–368.
- [Tol, 2009] Tol, R. S. (2009). The economic effects of climate change. *Journal of economic perspectives*, 23(2):29–51.
- [Udry, 1995] Udry, C. (1995). Risk and saving in northern nigeria. *The American Economic Review*, 85(5):1287–1300.
- [Wooldridge, 2010] Wooldridge, J. M. (2010). *Econometric analysis of cross section and panel data*. MIT press.
- [Zeileis, 2021] Zeileis, A. (2021). *pwt10: Penn World Table (Version 10.x)*. R package version 10.0-0.

[Zivin and Neidell, 2010] Zivin, J. G. and Neidell, M. J. (2010). Temperature and the allocation of time: Implications for climate change. Technical report, National Bureau of Economic Research.