



BANCA D'ITALIA
EUROSISTEMA

Temi di discussione

(Working Papers)

ABC dei modelli per lo studio delle politiche del clima

di Alberto Locarno

Aprile 2026

Numero

1530



BANCA D'ITALIA
EUROSISTEMA

Temi di discussione

(Working Papers)

ABC dei modelli per lo studio delle politiche del clima

di Alberto Locarno

Numero 1530 - Aprile 2026

I lavori pubblicati nella collana dei “Temi di discussione” presentano risultati preliminari e sono distribuiti al pubblico al fine di stimolare la discussione e sollecitare commenti.

I lavori pubblicati nella serie riflettono esclusivamente le opinioni degli autori e non impegnano la responsabilità dell’Istituto.

Comitato editoriale: ANTONIO DI CESARE, ELIANA VIVIANO, MARCO ALBORI, DIEGO BOHORQUEZ, GIULIO CARLO VENTURI, ALESSANDRO CANTELMO, ANTONIO MARIA CONTI, ANTONIO CORAN, MARCO FLACCADORO, SIMONA GIGLIOLI, GABRIELE MACCI, CLAUDIO LUCCIOLETTI, PASQUALE MADDALONI, ANDREA PAPETTI, GABRIELE ROVIGATTI, DARIO RUZZI, MATTEO SANTI, FEDERICO TULLIO.
Aspetti editoriali: ROBERTO MARANO, CARLO PALUMBO.

ISSN 2281-3950 (online)

Stampa a cura della Divisione Editoria e stampa della Banca d’Italia

ABC DEI MODELLI PER LO STUDIO DELLE POLITICHE DEL CLIMA

di Alberto Locarno*

Sommario

Questo paper è una rassegna di contributi presenti in letteratura sui modelli di valutazione integrata (MVI) e sulle loro applicazioni. Gli MVI sono modelli econometrici che includono equazioni che riproducono il ciclo del carbonio e i suoi effetti sulla temperatura; prendendo come esempio i modelli DICE e RICE sviluppati dal premio Nobel Nordhaus, il lavoro descrive le modifiche necessarie a far sì che gli MVI siano in grado di dare conto dell'interazione tra economia e clima e consentano di valutare costi e benefici delle politiche di riduzione delle emissioni di CO_2 .

Le principali indicazioni che possono essere tratte dall'uso degli MVI sono che (i) i costi delle politiche necessarie ad eliminare l'esternalità climatica sono di entità sopportabile e non ridurrebbero drammaticamente le prospettive di crescita dell'economia globale; (ii) solo le politiche che incidono sul prezzo delle fonti di energia fossile sono in grado di azzerare le emissioni di gas serra, mentre le politiche monetarie possono contribuire solo in misura marginale; (iii) le strategie che si prefiggono un tetto all'aumento della temperatura o una data entro cui arrivare all'azzeramento delle emissioni sono sub-ottimali, perché non tengono adeguatamente conto degli oneri che misure troppo ambiziose - o troppo blande - impongono alla collettività.

Classificazione JEL: E1, O44, O33, Q41, Q54.

Parole chiave: cambiamenti climatici, ciclo del carbonio, danni, esternalità, tasse pigouviane, tasso di sconto.

DOI: 10.32057/0.TD.2026.1530

* Banca d'Italia, Via Nazionale 91, 00184 Roma. Le opinioni espresse in questo lavoro sono quelle dell'autore e non coinvolgono in alcun modo la Banca d'Italia. Ringrazio Fabio Capasso, Pietro Cova, Paolo Del Giovane, Ivan Faiella e Marco Taboga per gli utili consigli e per i suggerimenti che hanno contribuito a rendere migliore questo lavoro.

1 Introduzione

Da sempre l'uomo modifica l'ambiente in cui vive: con la caccia ha portato all'estinzione di numerose specie animali; con l'agricoltura ha ridotto la superficie boschiva e ridisegnato il paesaggio rurale; con la costruzione di canali e dighe ha alterato il corso dei fiumi. Nessuna di queste trasformazioni però ha avuto in un arco di tempo così ristretto conseguenze paragonabili a quelle dell'alterazione del ciclo del carbonio e del clima. Le emissioni di CO_2 , connesse in particolare con l'uso dei combustibili fossili per finalità produttive o di consumo, perturbano l'equilibrio energetico del pianeta, causando non solo temperature più elevate, ma anche l'innalzamento del livello degli oceani e l'aumento della frequenza di eventi meteorologici estremi.

L'analisi economica può svolgere un ruolo importante nel valutare costi e benefici di politiche alternative di riduzione della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera e di contenimento dell'aumento delle temperature, suggerendo provvedimenti che possono favorire l'allineamento dei prezzi dei combustibili fossili al costo che impongono alla società. Questo può avvenire ponendo limiti quantitativi all'utilizzo di fonti di energia inquinanti oppure aumentandone il prezzo per renderne meno conveniente l'utilizzo. Di estrema importanza è anche il contributo alla quantificazione dei danni che il cambiamento climatico arreca all'economia, nonché la valutazione delle politiche di adattamento, per esempio attraverso migrazioni o innovazioni tecnologiche, che mitigano i costi sociali del riscaldamento globale.

Per fare questo è però necessario disporre di modelli sofisticati, che, oltre a descrivere l'interazione tra agenti economici, includano anche equazioni che riproducono il ciclo del carbonio, i suoi effetti sulla temperatura e i danni all'attività economica e al benessere sociale causati dal riscaldamento globale. Modelli di questo tipo, denominati Modelli di Valutazione Integrata (MVI),¹ sono stati sviluppati a partire dagli anni '70 dal premio Nobel William D. Nordhaus.² Le prime versioni si limitavano a studiare la relazione tra PIL, emissioni

¹Il termine inglese normalmente utilizzato per indicare questi modelli è *Integrated Assessment Models*, cui corrisponde l'acronimo IAM. L'aggettivo *Integrated* si riferisce al fatto che questi modelli aggiungono alle equazioni tipiche dei modelli macro-econometrici quelle che descrivono l'impatto sulla temperatura delle emissioni generate dall'attività produttiva e i danni che il riscaldamento causa al benessere delle persone; il sostantivo *Assessment* invece sta a indicare che questi modelli hanno come obiettivo quello di valutare l'impatto delle politiche per la transizione "verde" e per individuare quelle che massimizzano i risultati al minor costo possibile.

²Per alcuni autori vanno considerati MVI sia i modelli creati negli anni '60 per studiare gli effetti dell'eccessivo aumento demografico sia quelli sviluppati successivamente per valutare

e concentrazione di CO_2 nell'atmosfera, ma non includevano equazioni che ne valutavano l'impatto sull'aumento delle temperature o che quantificavano i danni provocati dai cambiamenti climatici; inoltre, il livello di attività economica – il PIL – era considerato una variabile esogena. La prima versione del modello DICE³ con una descrizione completa dell'interazione tra clima ed economia è stata presentata nel 1994; due anni dopo è stato pubblicato il modello RICE,⁴ che considera più paesi (o macroregioni) e consente quindi di studiare le conseguenze di politiche non-cooperative di riduzione delle emissioni.

L'estensione a più aree geografiche è fondamentale, perché il clima, come ricorda Nordhaus,⁵ pur essendo un fenomeno globale, non coinvolge tutti i paesi allo stesso modo: la posizione geografica, il livello di reddito e i danni che l'aumento delle temperature (e la maggior frequenza di eventi climatici estremi) possono causare generano incentivi difformi e possono portare ad adottare misure contro le emissioni più o meno rigorose, spingendo anche a ricorrere a strategie opportunistiche. I modelli devono essere perciò in grado di individuare le politiche climatiche più efficaci sia in contesti cooperativi, che consentono di distribuire in modo meno asimmetrico i costi della riduzione o azzeramento delle emissioni di CO_2 , sia in contesti conflittuali.

La scelta delle politiche ottimali presuppone però la capacità di valutarne adeguatamente costi e benefici, impresa già ardua per le politiche monetarie e fiscali, ma enormemente più complicata per quelle climatiche. Mentre i progressi della scienza del clima hanno permesso di arrivare a misurare in modo affidabile l'impatto delle emissioni sulla concentrazione di biossido di carbonio nell'atmosfera, non hanno però ottenuto gli stessi risultati nel quantificare come questa si traduca in un aumento delle temperature, specie in presenza di discontinuità e punti di non ritorno ("*tipping point*"). Le maggiori difficoltà si incontrano però quando si devono quantificare i danni provocati dal riscaldamento globale, spesso difficili da identificare, tranne forse in agricoltura, e ardui da stimare, per la carenza di serie storiche adeguate, a fronte dei costi delle politiche di mitigazione, che sono invece concentrati sul presente o sull'immediato futuro.⁶

gli effetti macroeconomici di shock petroliferi. Cfr. van Beek *et al.* (2020). In questo lavoro il termine MVI è usato esclusivamente per indicare i modelli econometrici che si occupano dell'interazione tra economia e clima.

³DICE è l'acronimo di *Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*.

⁴RICE è l'acronimo di *Regional dynamic Integrated model of Climate and the Economy*.

⁵Cfr. Nordhaus (2013).

⁶Su quello che sappiamo e quello che ignoriamo dei cambiamenti climatici, cfr. Pindyck (2022), in particolare i capitoli 3.3 e 3.4. L'incertezza sugli effetti dell'aumento delle temperature sull'economia è la ragione che spinge Pindyck a esprimere scetticismo sulla possibilità di usare i modelli di valutazione integrata per la selezione delle politiche climatiche.

Gli sviluppatori e gli utilizzatori di MVI sono ben consapevoli dell'incertezza che circonda l'intensità e gli effetti dei cambiamenti climatici. Gli esercizi di *policy evaluation* vengono perciò effettuati facendo ricorso a simulazioni Monte Carlo (che consentono di associare ai parametri più rilevanti una distribuzione di probabilità, anziché un valore puntuale) e/o aggregando i risultati di più modelli (per tener conto dell'incertezza sulla corretta forma funzionale di alcune equazioni).⁷

La struttura di questo lavoro è la seguente. La prossima sezione descrive in termini non-tecnici come l'attività umana sia responsabile dell'aumento delle temperature osservato negli ultimi decenni: lo sfruttamento di combustibili fossili nell'attività produttiva e nei consumi comporta l'immissione nell'atmosfera di gas serra, che alterano il bilancio energetico della Terra, ripristinato solo con il surriscaldamento dell'atmosfera.

La sezione successiva presenta le equazioni che vengono introdotte negli MVI per spiegare la relazione tra attività economica e cambiamenti climatici. Il primo blocco di equazioni descrive la circolazione del biossido di carbonio:⁸ le emissioni di CO_2 di natura antropica non si riversano per intero nell'atmosfera, ma vengono in parte catturate dagli oceani e dalla vegetazione terrestre, per essere poi rilasciate successivamente. Il secondo blocco di equazioni costituisce il cosiddetto modello del clima e descrive come l'aumento della concentrazione di CO_2 , creando uno squilibrio tra energia in ingresso ed energia in uscita, porta a un aumento della temperatura dell'atmosfera e degli oceani. Il terzo blocco di equazioni consente di quantificare i danni prodotti dal riscaldamento globale, misurati in termini di perdita di PIL. Nell'insieme, i tre blocchi di equazione permettono di tenere traccia tanto dell'impatto dell'attività economica sul clima quanto degli effetti di retroazione.

La sezione 4 è dedicata alle materie prime energetiche, incluse le rinnovabili: modellare domanda e offerta delle fonti di energia è di fondamentale importanza, visto che la transizione energetica richiede il passaggio dalle fonti inquinanti a quelle verdi. Le materie prime energetiche presentano caratteristiche disomogenee: petrolio e metano sono risorse disponibili in quantità finita, il cui prezzo è molto superiore ai costi di produzione ed è fortemente influenzato dalle po-

⁷Pindyck (2022) è molto scettico su queste soluzioni. Non senza ragione osserva che se si crea un modello che fa dipendere B da A senza sapere come A influenza B, effettuare simulazioni Monte Carlo non aiuta a rendere noto quello che è ignoto.

⁸Il biossido di carbonio è il più importante, ma non l'unico, dei gas serra prodotti dall'attività umana; nella maggior parte degli MVI si ipotizza per semplicità che anche gli altri gas serra possano essere espressi in termini di CO_2 .

litiche di offerta dei produttori, mentre il carbone (come anche le rinnovabili) è disponibile quasi ovunque in quantità pressoché illimitata e quindi garantisce ricavi non molto superiori alle spese necessarie all'estrazione.⁹

La sezione successiva si occupa di progresso tecnico, con particolare riferimento alle innovazioni volte a ridurre l'intensità energetica dell'attività produttiva: se il prezzo delle materie prime sale, in risposta a un eccesso di domanda, aumentano gli incentivi a investire in tecnologie che ne consentano il risparmio, sottraendo risorse alla ricerca finalizzata a migliorare l'efficienza del capitale o la produttività del lavoro (*directed technical change*). L'opposto accade quando invece le materie prime energetiche sono disponibili in abbondanza e a basso prezzo.

Le emissioni possono essere ridotte dall'azione dei governi, promuovendo l'efficientamento energetico consentito dal progresso tecnico e disincentivando l'uso delle fonti di energia più inquinanti. I cambiamenti climatici costituiscono un'esternalità indotta dalle emissioni di CO_2 inerenti l'attività produttiva o il consumo; il disallineamento tra costi privati e pubblici crea inefficienza e giustifica l'intervento dei governi, che hanno a disposizione un numero ristretto di strumenti per rimuovere l'esternalità: la tassazione o il contingentamento.¹⁰ Questo è l'argomento trattato nella sezione 6, che confronta vantaggi e svantaggi di una *carbon tax* e di un sistema di scambio di diritti di emissione.

La parte successiva è dedicata invece alle altre equazioni necessarie a completare un MVI.

I modelli DICE e RICE di Nordhaus sono presentati nelle sezioni 8 e 9: pur essendo di dimensione medio piccola e meno analitici di altri modelli nella descrizione del funzionamento dell'economia, possono essere considerati i capostipite della famiglia degli MVI. Grazie alla loro dimensione ridotta sono in grado di rendere trasparenti le connessioni tra variabili e facilitare le valutazioni comparate di costi e benefici delle misure di mitigazione delle emissioni. Poiché le politiche climatiche coprono orizzonti temporali lunghi, i modelli DICE e RICE hanno in genere come unità temporale il decennio e astraggono per costruzione dalle dinamiche congiunturali: il mercato del lavoro è sempre in equilibrio; la politica fiscale entra in gioco solo nel caso sia in vigore una *carbon tax*; la politica monetaria, il principale strumento di stabilizzazione ciclica, non è presente.

⁹Cfr. Hassler *et al.* (2016a), pp. 527-528.

¹⁰Un'altro strumento a disposizione dei governi sono i sussidi, che possono svolgere una funzione analoga alla *carbon tax* oppure finanziare la ricerca di fonti di energia pulita.

Alcuni lavori recenti cercano di valutare il ruolo che la banca centrale può avere nella transizione energetica, sia quando lo strumento principale della politica monetaria è il tasso di interesse di mercato monetario sia quando invece sono le misure non convenzionali, come i programmi di acquisto titoli. Questo è l'argomento trattato nella sezione 10; la conclusione di questi lavori è che il contributo che può essere offerto dalla politica monetaria è in genere modesto.

La sezione successiva presenta i risultati di simulazioni volte a valutare strategie alternative di riduzione delle emissioni: come evidenziato da Tol e Kotchen,¹¹ le politiche che hanno un obiettivo prefissato in termini di temperature – per esempio limitandone l'aumento a $2^{\circ}C$ ¹² – o si prefiggono l'azzeramento delle emissioni entro una certa data – per esempio il 2050 – non sono in genere quelle ottimali, perché non consentono di massimizzare il saldo tra benefici e costi sociali; nonostante ciò, sono quelle più frequentemente adottate in pratica,¹³ verosimilmente perché più facilmente comunicabili e interpretabili dal pubblico.

Le successive due sezioni, che precedono quella conclusiva, si occupano rispettivamente del dibattito suscitato dalla pubblicazione nel Regno Unito nel 2008 del Rapporto Stern e delle critiche che sono state mosse ai modelli di valutazione integrata, in particolare quelle formulate da Pindyck, che ne contesta l'utilità nel valutare le politiche di riduzione delle emissioni e nella stima del costo sociale del carbonio.

Questo lavoro è una rassegna di contributi presenti in letteratura sui modelli di valutazione integrata; si basa soprattutto sugli articoli di Hassler e Krusell e sui libri di Nordhaus, Pindyck e Tol citati in bibliografia. Non ha quindi elementi di particolare originalità, se non nella selezione del materiale che è stato incluso. La trattazione degli argomenti è tenuta al livello più elementare possibile, in quanto il lavoro non è indirizzato a economisti di professione e tantomeno a esperti climatologi, ma a persone sensibili al problema del riscaldamento globale e interessate a comprendere l'interazione tra attività economica e aumento delle temperature. Infine, il lavoro è scritto in italiano, per raggiungere lettori non a proprio agio con testi redatti in lingua straniera.

¹¹Cfr. Tol (2019) e Kotchen (2024).

¹²Secondo Tol, "Due gradi è un obiettivo arbitrario, fissato da 11 professori tedeschi e adottato a livello internazionale per mancanza di un'alternativa." Cfr. Tol (2019), pagg. 125 e 128.

¹³In Kotchen (2024), pag. 304, si trova l'affermazione seguente: "[...] l'obiettivo concordato a livello internazionale di mantenere la temperatura media globale a meno di 2 gradi Celsius sopra i livelli preindustriali [...] si traduce in un obiettivo di riduzione delle emissioni che, pur essendo forse considerato cruciale da una prospettiva scientifica, non è necessariamente il risultato di un bilanciamento tra benefici e costi. [...] I governi di molti Paesi, a vari livelli, hanno assunto impegni per ridurre le emissioni entro quantità e date specifiche [...]."

2 Le cause dei cambiamenti climatici¹⁴

L'idea che l'attività dell'uomo possa portare ad alterazioni del clima data almeno un paio di secoli, anche se è grazie soprattutto agli studi effettuati a partire dalla seconda metà del '900 che si è raggiunta la sostanziale certezza che il riscaldamento della Terra osservato a partire dal 1850 sia prevalentemente di origine antropica. L'aumento recente delle temperature ha natura diversa da quelli sperimentati in passato: innanzitutto è globale, in quanto sta interessando la totalità della superficie terrestre, anche se non in modo uniforme; in secondo luogo si sta manifestando a una rapidità senza precedenti. La causa del riscaldamento è il cosiddetto effetto serra, che è un fenomeno naturale, ma che viene esacerbato dalle attività umane attraverso l'emissione di gas come l'anidride carbonica (CO_2),¹⁵ il metano (CH_4)¹⁶ e l'ossido di diazoto (N_2O).¹⁷

La teoria dell'effetto serra è stata proposta per la prima volta nel 1827 dal matematico e fisico francese Joseph Fourier, che ha ipotizzato che la temperatura della Terra fosse determinata in larga misura dall'effetto isolante dell'atmosfera, senza però essere in grado di descriverne i meccanismi. Un trentennio dopo l'irlandese John Tyndall, analizzando le proprietà dei gas presenti nell'atmosfera, ha identificato quelli responsabili dell'intrappolamento dei raggi infrarossi e dell'incompleta rifrazione del calore solare. Nel 1896 il fisico svedese Svante Arrhenius ha proposto una quantificazione dell'impatto sulla temperatura del raddoppio della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera. La formula da lui elaborata è ancora oggi una componente fondamentale degli MVI.

I raggi solari che colpiscono la Terra vengono in larga misura assorbiti dall'atmosfera e dalla superficie terrestre; una parte non irrilevante – circa il 30% – viene ridiretta verso l'esterno dalle superfici con un elevato potere riflettente.¹⁸

¹⁴Questa sezione si basa soprattutto su tre fonti: l'articolo di Hsiang e Kopp (2018), che fornisce un'esposizione non specialistica delle basi scientifiche del cambiamento climatico; il libro di Tol (2019), in particolare il primo capitolo; il volume a più mani 'Lessico e Nuvole' (2020), curato da Latini, Bagliani e Orusa.

¹⁵L'anidride carbonica o biossido di carbonio è prodotto essenzialmente dall'uso di combustibili fossili, ma è conseguenza anche della deforestazione e della produzione di cemento.

¹⁶Fonti di emissioni di metano sono per esempio gli allevamenti di ruminanti, le risaie, le discariche e la decomposizione di piante in ambienti anaerobici.

¹⁷L'ossido nitroso è emesso principalmente da terreni agricoli trattati con fertilizzanti che contengono azoto.

¹⁸La frazione di luce riflessa da una superficie è detta *albedo*. Il valore massimo, pari a 1, si ha per superfici perfettamente bianche, mentre quello minimo, pari a 0, è proprio di quelle completamente nere. Le nubi e le aree coperte da ghiaccio e neve presentano un elevato potere riflettente, mentre oceani e foreste di conifere tendono a trattenere quantità elevate di luce. Anche le strutture urbane, per esempio il colore dei tetti, incidono sulla quantità di energia rilasciata dalla superficie terrestre.

La Terra, che assorbe l'energia inviata dal Sole, si surriscalda ed emette a sua volta radiazioni, che si disperdono nello spazio. Alcuni gas presenti nell'atmosfera – i gas a effetto serra, come l'anidride carbonica e il metano, ma anche il vapore acqueo – trattengono una parte delle radiazioni in uscita, reindirizzandole verso la Terra:¹⁹ si crea quindi uno squilibrio tra flussi di energia in entrata e in uscita, che porta l'atmosfera a surriscaldarsi, la temperatura a crescere e le radiazioni emesse dalla superficie terrestre a intensificarsi. Questo processo continua finché l'equilibrio energetico non è ripristinato, in corrispondenza di una temperatura più elevata. Senza l'effetto serra la temperatura media del pianeta sarebbe pari a circa -18°C , molto inferiore al punto di congelamento dell'acqua; le condizioni di vita del pianeta sarebbero proibitive per gran parte delle specie viventi.²⁰ La presenza di gas serra nell'atmosfera non è quindi di per sé dannosa, ma lo diventa quando l'attività umana ne aumenta a tal punto la concentrazione da causare profonde alterazioni al clima.²¹

3 Interazione tra clima e attività economica

L'attività economica influenza il clima, che a sua volta modifica le condizioni di produzione e consumo.²² Questo legame bidirezionale viene modellato negli MVI aggiungendo tre blocchi di equazioni, che descrivono rispettivamente: (i) l'impatto delle emissioni prodotte dalla combustione di carbon fossile sulla concentrazione di CO_2 nell'atmosfera ("*carbon circulation model*"); (ii) la risposta della temperatura a variazioni nella concentrazione di CO_2 ²³ ("*climate model*"); (iii) gli effetti economici e sociali dei cambiamenti climatici, che vengono tradotti in una metrica monetaria, o più precisamente in una perdita di PIL, per consentire l'integrazione con le altre equazioni del modello ("*damage function*").

Questo blocco di equazioni si aggiunge ad altre che sono invece di tipo più tradizionale, in linea con un modello di crescita à la Solow, con risparmio endo-

¹⁹I raggi solari sono radiazioni elettromagnetiche a onda corta, mentre le radiazioni emesse dalla superficie terrestre sono a onda lunga: solo queste ultime vengono assorbite dalle molecole dei gas serra.

²⁰In assenza di gas serra la temperatura media del pianeta risulterebbe determinata dalla temperatura del Sole, dalla distanza della Terra dal Sole e dalla riflettività della Terra

²¹L'Appendice A contiene una descrizione più dettagliata dell'effetto serra e del bilancio energetico terrestre.

²²Questa sezione attinge in larga misura da Hassler, Krusell e Smith (2016) e soprattutto Royal Swedish Academy of Sciences (2018).

²³L'anidride carbonica non è l'unico gas serra prodotto dall'attività umana, ma è quello più rilevante per lo studio dei cambiamenti climatici, perché rimane nell'atmosfera più a lungo: mentre per il metano il periodo di dimezzamento della concentrazione è di circa 10 anni, la CO_2 può rimanere nell'atmosfera per oltre un millennio.

geno e imprese che massimizzano i profitti, combinando capitale, lavoro e una pluralità di fonti di energia, caratterizzate da un diverso impatto ambientale. Un elevato grado di dettaglio è anche dedicato a modellare la domanda e l'offerta di materie prime e fonti energetiche, per tener conto del fatto che alcune di esse sono disponibili in quantità finita e che il loro sfruttamento nell'attività produttiva dipende dalla tassazione e dall'innovazione tecnologica. Per quel che riguarda infine le politiche economiche, quella monetaria non è in genere considerata, dato che le questioni legate ai cambiamenti climatici coprono orizzonti temporali lunghi, mentre quella fiscale è incentrata soprattutto sulla descrizione delle misure necessarie a favorire la transizione energetica, come forme di *carbon pricing*, sussidi e trasferimenti necessari a indennizzare i settori dell'economia maggiormente penalizzati dalle politiche di azzeramento delle emissioni.

I modelli più sofisticati, sull'esempio di quello RICE di Nordhaus, sono a più paesi e consentono di valutare l'impatto sia di politiche per la transazione energetica concordate a livello globale sia di politiche non coordinate, che danno origine a comportamenti opportunistici e a equilibri non-cooperativi.

3.1 La circolazione del biossido di carbonio

Le emissioni di CO_2 legate all'attività umana si disperdono rapidamente nella troposfera, la parte più bassa dell'atmosfera. La circolazione dell'anidride carbonica non si esaurisce però in questo passaggio, in quanto tra livelli dell'oceano, biosfera²⁴ e strati dell'atmosfera avviene uno scambio continuo di CO_2 . Con la fotosintesi, per esempio, la vegetazione della biosfera sottrae anidride carbonica dall'atmosfera, aggiungendone invece con l'ossidazione e la combustione; attraverso un processo analogo anche il fitoplancton presente negli oceani cattura CO_2 , che viene in parte restituita quando le acque si riscaldano. La maggior parte dell'anidride carbonica è immagazzinata negli oceani, mentre quella che resta nell'atmosfera è inferiore anche a quella trattenuta dai terreni delle regioni fredde, dove il suolo è permanentemente gelato (*permafrost*). Per capire il contributo dell'uomo alla concentrazione di CO_2 nell'atmosfera non è quindi sufficiente calcolare la quantità emessa attraverso l'attività produttiva e il consumo, ma è necessario tener conto della parte che viene prima assorbita e poi rilasciata dagli altri bacini.

²⁴La biosfera è normalmente definita come la parte della Terra dove prevalgono condizioni ambientali che consentono lo sviluppo della vita; essa include la litosfera (suolo e parte del sottosuolo), l'idrosfera (acque marine, fluviali e lacustri) e la parte inferiore dell'atmosfera.

Nei primi modelli sviluppati negli anni '70 Nordhaus distingueva sette bacini, ottenuti da una bipartizione dell'oceano e dell'atmosfera e da una tripartizione della biosfera; successivamente si è limitato a considerarne solo tre, ovvero (i) l'atmosfera, (ii) la biosfera e (iii) la parte più profonda degli oceani. Nel modello DICE per esempio il sistema di equazioni che descrive la circolazione dell'anidride carbonica è il seguente:

$$\begin{aligned}
 M_t - M_{t-1} &= -\phi_{12}M_{t-1} + \phi_{21}M_{t-1}^U + E_t \\
 M_t^U - M_{t-1}^U &= \phi_{12}M_{t-1} - (\phi_{21} + \phi_{23})M_{t-1}^U + \phi_{32}M_{t-1}^L \\
 M_t^L - M_{t-1}^L &= \phi_{23}M_{t-1}^U - \phi_{32}M_{t-1}^L
 \end{aligned} \tag{1}$$

dove M_t , M_t^U e M_t^L rappresentano, rispettivamente, la quantità di CO_2 immagazzinata nell'atmosfera, nella biosfera (eccettuata la parte inferiore dell'idrosfera) e nelle profondità degli oceani, mentre E_t indica le emissioni dovute all'attività umana. Due caratteristiche del modello appaiono evidenti: la prima è che E_t entra solo nella prima equazione; la seconda è che tutti i coefficienti appaiono una volta con il segno più e una volta con il segno meno. La prima proprietà riflette il fatto che le emissioni aumentano la concentrazione di CO_2 solo nell'atmosfera, mentre la seconda è conseguenza del fatto che l'anidride carbonica non svanisce, per cui la quantità che si trasferisce in un bacino è sottratta da un altro.

Questo blocco di equazioni è di fondamentale importanza per simulare gli effetti delle politiche di mitigazione, in quanto consente di stimare come cambia la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera in tutti i possibili scenari di emissione.

Nonostante i suoi meriti nel descrivere in modo chiaro e intuitivo il ciclo della CO_2 , il sistema (1) ha il difetto di semplificare eccessivamente un processo molto più complicato. I parametri che misurano gli scambi di CO_2 tra biosfera e oceani non sono costanti: la capacità degli oceani di trattenere anidride carbonica diminuisce all'aumentare della temperatura e qualcosa di analogo accade anche per la biosfera. Miglioramenti potrebbero essere ottenuti aggiungendo tra le variabili esplicative del sistema (1) la temperatura, che comunque non è l'unica variabile omessa; andrebbe poi risolto il problema della forma funzionale, che solo in prima approssimazione e su orizzonti temporali (relativamente) brevi è lineare. Un'alternativa è quella di considerare una forma ridotta, che descrive il tasso di decadimento delle emissioni di CO_2 . Secondo Archer²⁵ il 75% dell'anidride carbonica emessa nell'atmosfera ha una vita media di circa

²⁵Cfr. Archer (2005).

300 anni, mentre il 25% restante vi resta per migliaia di anni. Golosov e i suoi coautori:²⁶ propongono di usare la seguente formula di decadimento:

$$d(s) = 1 - \left[\phi_L + (1 - \phi_L)\phi_0(1 - \phi)^s \right] \quad (2)$$

dove $d(s)$ rappresenta la quota di CO_2 che lascia l'atmosfera dopo s periodi. $d(s)$ è funzione di tre parametri: ϕ_L misura la quota di CO_2 che rimane permanentemente nell'atmosfera; $1 - \phi_0$ rappresenta la parte con vita media finita che in circa un decennio fuoriesce dall'atmosfera e si riversa nella biosfera e negli oceani;²⁷ ϕ è il tasso di decadimento della parte restante di CO_2 , la cui vita media è di circa 300 anni.

Una calibrazione che consente di replicare il tasso di decadimento suggerito da Archer si ottiene aggiungendo la condizione $d(1) = \frac{1}{2}$, ovvero il requisito che dopo un decennio la metà di CO_2 lascia l'atmosfera. I valori corrispondenti dei tre parametri sono i seguenti:²⁸

$$\phi_L = 0,2 \quad \phi = 0,023 \quad \phi_0 = 0,38 \quad (3)$$

La concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera è quindi ottenuta cumulando le emissioni di ogni periodo al netto della quota che si dissolve nel tempo, ovvero:

$$M_t = \sum_{s=0}^{\infty} (1 - d(s)) E_{t-s} \quad (4)$$

3.2 Temperatura e CO_2 : il modello del clima

Il clima²⁹ è influenzato dalla quantità di anidride carbonica presente nell'atmosfera. Supponiamo di partire da una situazione di equilibrio, in cui l'energia in ingresso proveniente dal sole è pari a quella che la terra irradia nello spazio esterno: se qualcosa perturba questo equilibrio, determinando un influsso netto

²⁶Cfr. Golosov *et al.* (2014).

²⁷Nella (2) manca il termine, $(1 - \phi_L)(1 - \phi_0)$, che rappresenta la CO_2 che scompare in un decennio, che non è inclusa nell'equazione perché l'unità di tempo considerata da Golosov *et al.* è appunto pari a dieci anni.

²⁸Il valore di ϕ è la soluzione dell'equazione: $(1 - \phi)^{300} = \frac{1}{2}$, che esprime la condizione che la vita media del biossido di carbonio nell'atmosfera sia di 300 anni; ϕ_0 invece è determinato in modo tale che la quota di CO_2 che si dissolve in un decennio (cfr. not precedente) sia pari a 0,5.

²⁹Con il termine clima non ci si riferisce solo alle temperature. Latini *et al.* (2019) definiscono il clima come la descrizione statistica - effettuata in un arco di tempo che va da mesi a migliaia o milioni di anni - in termini di media e variabilità di grandezze rilevanti come la temperatura, le precipitazioni, l'umidità, l'intensità e direzione del vento e altro ancora.

di energia pari a F ,³⁰ si crea un accumulo di calore sulla terra, che innalza la temperatura; poiché un corpo emette tanta più energia quanto più è caldo, anche quella irradiata dalla terra aumenta. Questo effetto, detta retroazione di Planck ("Plank feedback"), attiva un processo che gradualmente consente di ripristinare il bilancio energetico, anche se a una temperatura più elevata.

Uno dei fattori che può alterare l'equilibrio energetico e influenzare la temperatura sono le emissioni di CO_2 prodotte dall'attività umana. Poiché l'anidride carbonica resta nell'atmosfera per secoli, quello che conta non sono solo le emissioni di oggi (E_t nell'equazione (1)), ma quelle che si sono accumulate nel corso del tempo (M_t nella stessa equazione). Oltre un secolo fa, il chimico svedese Svante Arrhenius ha derivato una relazione approssimata tra quantità di anidride carbonica nell'atmosfera (M_t) e forzante radiativo (F_t), ancora oggi ampiamente utilizzata:

$$F_t = \frac{\eta}{\ln 2} \ln \frac{M_t}{M_0} \quad (5)$$

dove M_0 è il livello pre-industriale di M_t e η è un parametro che misura come cambia il bilancio energetico quando la concentrazione di CO_2 raddoppia.³¹

Grazie all'equazione di Arrhenius, che traduce in forzante radiativo la quantità di CO_2 presente nell'atmosfera, è possibile calcolare l'impatto sulla temperatura dell'aumento della concentrazione dei gas serra. Nel modello DICE di Nordhaus questo risultato si ottiene attraverso un sistema lineare di due equazioni, che include non solo la temperatura media della superficie terrestre, ma anche quella dell'oceano, entrambe espresse in deviazione dal livello pre-industriale. Il sistema è il seguente:

$$\begin{aligned} T_t - T_{t-1} &= \sigma_1 \left((F_t + O_t - \kappa T_{t-1}) - \sigma_2 (T_{t-1} - T_{t-1}^O) \right) \\ T_t^O - T_{t-1}^O &= \sigma_3 (T_{t-1} - T_{t-1}^O) \end{aligned} \quad (6)$$

dove T_t e T_t^O rappresentano rispettivamente la temperatura dell'atmosfera (e di una frazione rilevante della biosfera)³² e quella della parte inferiore degli oceani; O_t è il forzante radiativo determinato dalle emissioni di gas serra diverse dalla CO_2 , come per esempio metano e aerosol; l'unità di tempo Δt è il decennio. Il

³⁰La variabile F è detta *forzante radiativo* ("radiative forcing") e la sua unità di misura è W/m^2 , ovvero Watt per metro quadro. Come unità di misura, 1 Watt indica la potenza necessaria per sollevare di 1 metro, nell'arco di 1 secondo, un peso di 100 grammi.

³¹Quando M_t raggiunge un livello doppio di quello del periodo pre-industriale, $\ln \frac{M_t}{M_0} = \ln \frac{2M_0}{M_0} = \ln 2$, che si semplifica con il denominatore della (5), facendo sì che $F_t = \eta$.

³²In pratica vengono aggregati i primi due strati del sistema (1).

termine κT_t nella prima equazione rappresenta la retroazione di Plank, ovvero il fatto che un corpo più caldo emette più calore: nel caso della terra questo significa che una quantità maggiore di energia si disperde nello spazio, riducendo l'aumento della temperatura necessario a ripristinare l'equilibrio energetico. Il termine $\sigma_2(T_{t-1} - T_{t-1}^O)$ indica invece lo scambio di energia tra atmosfera e oceano, che dipende dalla differenza di temperatura tra i due ambienti, e comporta quindi una riduzione dell'impatto di un dato valore di F_t su T_t .³³ Il parametro σ_1 infine determina la velocità con cui il forzante radiativo si traduce in un aumento della temperatura della superficie terrestre.³⁴

Simulando il sistema (6) è possibile stimare il tempo necessario perché variazioni del forzante radiativo si trasmettano alla temperatura dell'atmosfera: usando la calibrazione di Nordhaus e Boyer (2000) – $\sigma_1 = 0,226$, $\sigma_2 = 0,44$ e $\sigma_3 = 0,02$ – si ha che metà dell'impatto complessivo viene trasmesso in pochi decenni, mentre per arrivare al 90% sono necessari parecchi secoli.

Una variante del sistema (6) assume che il coefficiente di retroazione κ non sia costante, ma dipenda dalla temperatura; in questo modo è possibile catturare effetti soglia o punti di svolta. Un esempio del primo tipo si ha aggiungendo al modello del clima l'equazione seguente:

$$\kappa = \begin{cases} \kappa_0 & \text{se } T_t \leq \bar{T} \\ \kappa_1 & \text{se } T_t > \bar{T} \end{cases} \quad (7)$$

dove $\kappa_1 < \kappa_0$ e \bar{T} è la temperatura oltre la quale l'effetto di retroazione si riduce. Un punto di svolta (*tipping-point effects*) si ha invece quando il passaggio da κ_0 a κ_1 è permanente la prima volta che la temperatura supera la soglia \bar{T} .

Il sistema (6) indica che la temperatura smette di aumentare quando $F_t + O_t - \kappa T_t = 0$; trascurando per semplicità l'impatto dei gas serra diversi dall'anidride carbonica (ipotizzando cioè che $O_t = 0$), un nuovo equilibrio è ripristinato quando $T_t = \frac{F_t}{\kappa}$. Utilizzando l'equazione di Arrhenius, è possibile mettere in relazione temperatura e concentrazione di CO_2 nell'atmosfera, ottenendo la relazione

$$T(F_t) = \frac{\eta}{\kappa} \frac{1}{\ln 2} \ln \frac{M_t}{M_0} \quad (8)$$

³³Il valore di σ_2 è superiore a quello di σ_1 , ma dello stesso ordine di grandezza.

³⁴La velocità con cui T_t aumenta per un dato valore di F_t dipende inversamente dalla capacità termica dell'atmosfera, che è molto minore di quella degli oceani. Si ha quindi che $\sigma_1 \gg \sigma_3$.

da cui è possibile derivare l'impatto di un aumento del 100% dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera, ovvero:

$$T = \frac{\eta}{\kappa} \quad (9)$$

L'equazione (9) mostra l'importanza di avere stime affidabili di η e κ . Sulla base di quanto riportato in letteratura, Hassler, Krusell e Smith assumono che η sia pari a 3,7 e κ a 3,36; Nordhaus utilizza valori simili, ma lievemente superiori, per η , mentre fa ricorso a stime inferiori per κ .

Ai valori di consenso dei due parametri corrisponde però un rapporto η/κ pari a 1,1°C, ritenuto troppo basso, in quanto trascurerebbe numerosi meccanismi di retroazione, quali per esempio l'effetto albedo³⁵ e l'aumento della quantità di vapore acqueo nell'atmosfera causata dall'aumento della temperatura.³⁶ Il modo più semplice per tener conto di questi meccanismi di retroazione è quello di modificare il sistema (6) nel modo seguente:

$$\begin{aligned} T_t - T_{t-1} &= \sigma_1 \left((F_t + O_t + \chi T_t - \kappa T_t) - \sigma_2 (T_{t-1} - T_{t-1}^O) \right) \\ T_t^O - T_{t-1}^O &= \sigma_3 (T_{t-1} - T_{t-1}^O) \end{aligned} \quad (10)$$

L'aumento della temperatura necessario a ripristinare l'equilibrio energetico diventa quindi

$$T(F_t) = \frac{\eta}{\kappa - \chi} \frac{1}{\ln 2} \ln \frac{M_t}{M_0} \quad (11)$$

che si semplifica in $\frac{\eta}{\kappa - \chi}$ quando $M_t = 2M_0$. Secondo l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC),³⁷ il suo valore è presumibilmente compreso tra 1,5°C e 4,5°C; la probabilità che possa essere superiore a 6°C è molto bassa ed è quasi nulla quella che sia inferiore a 1°C.³⁸ Un valore ragionevole del rapporto $\frac{\eta}{\kappa - \chi}$ è quindi pari a 3,³⁹ che si ottiene quando $\chi = 2,1$: un aumento

³⁵L'albedo è la frazione di luce riflessa da un oggetto o da una superficie rispetto a quella che la colpisce; è massima per le superficie bianche, come per esempio le zone coperte da ghiaccio e neve. L'aumento della temperatura determina una diminuzione dell'estensione di queste aree, facendo diminuire la quantità di radiazione solare riflessa e amplificando così il riscaldamento iniziale.

³⁶Il vapore acqueo è di gran lunga il gas serra più presente nell'atmosfera; l'aumento della temperatura ne fa aumentare la quantità (del 7% circa per ogni grado centigrado in più) e quindi riduce l'energia che viene espulsa dall'atmosfera, che si riscalda ancora di più.

³⁷Cfr. IPCC, 1996.

³⁸In teoria il parametro χ potrebbe essere negativo, in quanto esistono anche meccanismi di retroazione che hanno effetti di segno opposto rispetto a quelli citati. In pratica, l'evidenza indica chiaramente che questa possibilità può essere tranquillamente esclusa.

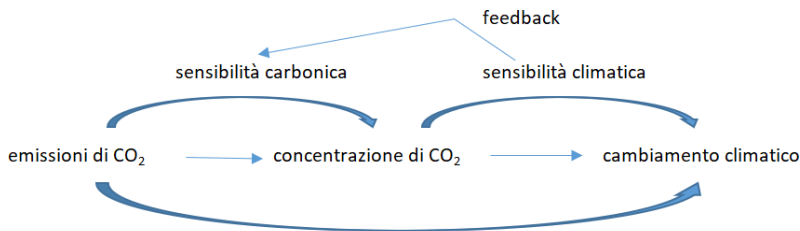
³⁹Stime non molto differenti sono riportate in versioni successive dei Rapporti dell'IPCC, per esempio in quello del 2021, in cui si conferma che il valore centrale resta quello di 3°C,

della temperatura di 3°C costituisce il valore mediano dell'intervallo di valori plausibili indicato dall'IPCC.

3.3 Una semplificazione: $E_t \rightarrow T_t$ anziché $E_t \rightarrow M_t \rightarrow T_t$

Modellare separatamente, come fatto nelle pagine precedenti, la circolazione della CO_2 e la risposta della temperatura alla concentrazione di gas serra nell'atmosfera consente di descrivere in modo analitico l'impatto dell'attività economica sul clima, anche se al costo di approssimazioni non sempre realistiche. Matthews e i suoi coautori⁴⁰ mostrano invece che è possibile un approccio sintetico, stabilendo un legame diretto, stabile e accurato tra la variazione della temperatura e la quantità di emissioni, legame definito da un parametro che chiamano CCR (*Carbon-Climate Response*), definito come: $CCR = \frac{\Delta T_t}{E_t} = \frac{\Delta T_t}{\Delta M_t} \times \frac{\Delta M_t}{E_t}$. Questo parametro costituisce la sintesi del modello della circolazione dell'anidride carbonica e di quello del clima, come si vede dalla figura sotto, ripresa da Matthews *et al.*, che sintetizza le caratteristiche fondamentali delle due modalità alternative di descrivere il legame E_t e T_t .

Fig. 1: Risposta del clima alle emissioni di CO_2



Secondo Matthews e i suoi coautori è possibile semplificare il legame tra emissioni e aumento delle temperature, sostituendo alle equazioni (1), (5) e (6) quella seguente:

$$T_{t+m} = T_t + CCR_t^m \sum_{s=t}^m E_s = T_t + CCR \sum_{s=t}^m E_s \quad (12)$$

Nonostante CCR sia il prodotto di due quantità che variano nel tempo, è sostanzialmente una costante (ovvero $CCR_t^m = CCR$), che non dipende né dalle

anche se viene innalzato a $2,5^{\circ}\text{C}$ l'estremo inferiore dell'intervallo dei valori più probabili. Cfr. IPCC (2021b).

⁴⁰Cfr. Matthews *et al.* (2009).

condizioni iniziali (che riflettono la concentrazione di biossido di carbonio nell'atmosfera in t , ovvero M_t , e sono catturate dall'indice t) né dall'intervallo di tempo su cui si calcolano le emissioni $\sum_{s=t}^m E_s$. La ragione è che il movimento monotonicamente decrescente di $\frac{\Delta T_t}{\Delta M_t}$ (evidenziato dalla forma funzionale logaritmica dell'equazione di Arrhenius, che indica che l'incremento del forzante radiativo si riduce all'aumentare della quantità di biossido di carbonio presente nell'atmosfera), è compensato da quello specularmente crescente di $\frac{\Delta M_t}{E_t}$ (che dipende dalla progressiva riduzione della capacità di assorbimento di CO_2 da parte della biosfera e degli oceani).

La sostanziale stabilità nel tempo di CCR è confermata dai risultati di simulazioni effettuate con modelli diversi per caratteristiche e calibrazione dei parametri; il suo valore è approssimativamente pari a 1,5, con un intervallo di confidenza al 95% che ha come estremo inferiore 1 ed estremo superiore 2,1.

3.4 I costi dell'aumento della temperatura

Le alterazioni al clima indotte dall'aumento delle temperature hanno costi economici difficili da quantificare. Secondo Hassler *et al.*⁴¹ è proprio l'assenza di stime affidabili dei danni arrecati dai cambiamenti climatici il punto di maggior debolezza degli studi sull'interazione tra clima ed attività economica. Non solo manca una quantificazione credibile di questi costi, ma neppure si sa con una qualche precisione quale ne sia la causa principale, se cioè essi dipendano dall'innalzamento del livello delle acque, dai problemi creati dall'aumento delle temperature o da altro. È probabile poi che esistano forti non-linearità, per cui mentre piccoli aumenti delle temperature avrebbero costi trascurabili, incrementi oltre una certa soglia potrebbero provocare catastrofi; quale sia poi questa soglia sfortunatamente non è noto. Un'ulteriore complicazione è legata al fatto che gli effetti dei cambiamenti climatici non sono distribuiti uniformemente tra paesi e gruppi sociali, rendendo importante tener conto dei loro effetti distributivi e di chi ne subisce più pesantemente le conseguenze.

Gli studi che cercano di stimare i danni prodotti dall'aumento delle temperature sono di due tipi:

- * quelli che mettono in relazione cambiamenti climatici e aggregati macroeconomici, in particolare il PIL (*top-down approach o reduced-form approach*);

⁴¹Cfr. Hassler, Krusell e Nycander (2016).

- * quelli che raccolgono le evidenze dei danni provocati dall'aumento delle temperature a livello disaggregato, identificando i canali attraverso cui si manifestano (per esempio con l'inondazione delle coste, la siccità, la perdita di biodiversità, ...) e poi aggregandoli (*bottom-up approach*).

Il maggior difetto del primo approccio è che non chiarisce quali siano i canali attraverso i quali i costi si materializzano e quindi non consente di valutare il contributo che può derivare da politiche di mitigazione e adattamento; il punto debole del secondo è che richiede il monitoraggio a livello globale dei danni provocati all'uomo e alla natura dai cambiamenti climatici.

Tra i lavori che hanno adottato il primo approccio, quello di Burke, Hsian e Miguel è tra i più influenti.⁴² Usando un campione che include 166 paesi e copre il periodo 1960-2010, i tre autori stimano la regressione seguente:

$$\Delta y_{i,t} = \mu_i + \nu_t + \beta_1 T_{i,t} + \beta_2 T_{i,t}^2 + \gamma_1 t_{i,t} + \gamma_2 t_{i,t}^2 + \varepsilon_{i,t} \quad (13)$$

dove $\Delta y_{i,t}$ e $T_{i,t}$, le due variabili oggetto di indagine, rappresentano rispettivamente la variazione relativa del PIL e la temperatura dell' i -esimo paese al tempo t . La regressione include anche altre variabili, come l'effetto fisso μ_i , che consente di tener conto delle differenze storiche e culturali che possono giustificare tassi di crescita diversi tra paesi, e la dummy temporale ν_t , che coglie shock globali, come aumenti generalizzati dei prezzi o innovazioni tecnologiche. Il polinomio di secondo grado in t ha invece il compito di catturare eventuali trend quadratici dei tassi di crescita del PIL, che possono derivare da politiche economiche o da mutamenti istituzionali.⁴³

Sulla base delle stime, il coefficiente β_1 risulta positivo e β_2 negativo; questo comporta che per ciascun paese l'impatto sulla crescita di $T_{i,t}$ sia inizialmente positivo, per poi diventare negativo una volta superato un valore soglia della temperatura, pari a circa $11^\circ C$. La funzione di danno globale è poi ottenuta dalla (13) aggregando la perdita di PIL di ciascun paese.

Per quanto apparentemente ragionevoli e conformi alle aspettative, le stime di Burke, Hsian e Miguel (e di lavori che usano una specificazione analoga) appaiono estreme: poiché l'aumento delle temperature influenza il tasso di crescita

⁴²Cfr. Burke, Hsian e Miguel (2015).

⁴³Come detto nelle pagine precedenti, se da un lato c'è chiara evidenza che $T_{i,t}$ influenza $\Delta y_{i,t}$, dall'altro è indiscutibile che vale anche la relazione inversa, ovvero che l'attività economica contribuisce al riscaldamento globale. Considerando però i ritardi con cui $\Delta y_{i,t}$ ha un impatto su $T_{i,t}$, non è necessario fare ricorso a variabili strumentali per stimare l'equazione (13).

del PIL, il livello del prodotto nei diversi paesi tende a divergere, con risultati difficilmente accettabili. Come mostrato da Hassler, Krusell e Olovsson,⁴⁴ per aumenti delle temperature $T_{i,t}$ corrispondenti a $2,5^{\circ}C$ di riscaldamento globale a fine secolo, le stime di Burke, Hsian e Miguel implicherebbero enormi benefici per i paesi del Nord Europa (con guadagni di oltre il 500% del PIL per Svezia e Finlandia) e danni rilevanti per quelli della fascia mediterranea (con un massimo del 32% per il Portogallo). Effetti così antitetici sono difficili da giustificare sulla base della relazione oggi osservabile tra temperature e livello del PIL.

Gli studi che invece adottano un approccio *bottom up* hanno come punto di partenza la definizione dei canali attraverso cui i cambiamenti climatici danneggiano l'economia e riducono il benessere delle famiglie. Uno studio importante che rientra in questo filone è il Rapporto PESETA IV, della Commissione Europea,⁴⁵ che stima gli effetti dei cambiamenti climatici che si manifestano attraverso (i) la tracimazione dei fiumi, (ii) le inondazioni nella fascia costiera, (iii) i danni all'agricoltura, (iv) la siccità, (v) le tempeste, (vi) le strozzature all'offerta di energia⁴⁶ e (vii) l'aumento della mortalità a causa delle ondate di caldo e di freddo. Lo studio, che sfortunatamente considera solo i paesi dell'Unione Europea e il Regno Unito, stima impatti complessivamente modesti, inferiori all'1,5% per PIL per aumenti della temperatura di $3^{\circ}C$ e poco superiori allo 0,5% per incrementi di $2^{\circ}C$. I costi non sono però uniformemente distribuiti: a fronte di danni trascurabili nell'Europa settentrionale, quelli stimati per la parte meridionale sono doppi di quelli medi, a causa soprattutto dell'aumento della mortalità provocato dalle ondate di calore.

Per quanto utili e credibili, studi come il rapporto PESETA hanno il difetto di non esaurire la lista dei canali attraverso cui la temperatura influenza le attività umane;⁴⁷ inoltre, l'accento posto sull'importanza dell'aumento della mortalità si scontra con la difficoltà di ottenere stime accurate.⁴⁸

⁴⁴Cfr. Hassler, Krusell e Olovsson (2024).

⁴⁵PESETA è l'acronimo di **P**rojection of **E**conomic impacts of climate change in **S**ectors of the **E**uropean Union based on **b**ottom-up **A**nalysis.

⁴⁶Il riscaldamento globale influenza la produzione di energia in diversi modi: la scarsità di acqua riduce in modo diretto la produzione di energia idroelettrica; temperatura e velocità del vento condizionano lo sfruttamento di fonti rinnovabili come l'eolico e il solare; la disponibilità e la temperatura dell'acqua influenzano la capacità di raffreddamento degli impianti nucleari, vincolandone, in caso di scarsità, l'utilizzo a pieno regime.

⁴⁷L'impatto dell'aumento delle temperature sulle migrazioni, la biodiversità e i conflitti sono alcuni tra i canali non quantificati nel rapporto PESETA.

⁴⁸Carleton e coautori stimano che per un aumento entro fine secolo della temperatura di $5^{\circ}C$ il costo globale dovuto all'aumento della mortalità sarebbe pari al 3,2% del PIL. La stima è però soggetta a elevata incertezza: un intervallo di confidenza del 50% avrebbe come estremi -5,4% e 9,1%; l'impatto sui singoli paesi sarebbe poi estremamente differenziato, variando da uno 0,1% per l'Europa a un 27,5% per il Pakistan. Cfr. Carleton *et al.* (2022).

Nordhaus⁴⁹ è stato un pioniere del secondo approccio, che ha esteso includendo anche una valutazione dei costi di eventi catastrofici a bassissima probabilità di verificarsi. Poiché su di essi non c'è praticamente evidenza empirica, la soluzione adottata da Nordhaus è stata quella di intervistare un gruppo selezionato di scienziati esperti di clima, chiedendo loro una quantificazione dei danni che potrebbero derivare dal materializzarsi di eventi estremi. La soluzione proposta da Nordhaus, che è diventata lo standard di riferimento per la letteratura sui modelli di valutazione integrata, è quella di aggiungere questi costi a quelli calcolati con un approccio di tipo *bottom-up*, mettendoli poi in relazione con le variazioni della temperatura.

Sulla base dell'evidenza presentata in numerosi studi i danni causati dai cambiamenti climatici sarebbero mediamente contenuti nelle economie avanzate, ma più consistenti in alcuni paesi emergenti e in via di sviluppo. Queste stime vanno però valutate con estrema cautela: in primo luogo non sempre incorporano le conseguenze di eventi catastrofici, che sono difficili da quantificare perché manca adeguata evidenza empirica; in secondo luogo trascurano il fatto che gli shock che colpiscono un settore hanno ricadute anche su altri (*spillover*), amplificandone la portata; infine non includono danni per cui non esiste una valutazione di mercato, come per esempio quelli derivanti dalla perdita di biodiversità, dall'aumento dei conflitti o dall'incremento dei flussi migratori.

La stima dell'impatto dei cambiamenti climatici è perciò soggetta a un elevato grado di incertezza, che mina l'attendibilità delle funzioni di danno utilizzate negli MVI: secondo Pindyck⁵⁰ questo non costituisce un problema per aumenti della temperatura non superiori a 2°C, che hanno presumibilmente effetti modesti, ma lo diventa quando si considerano incrementi superiori, perché in quel caso la funzione di danno non è di alcun aiuto.

3.4.1 La funzione di danno

Nel modello DICE si trova la seguente equazione:

$$\Omega(T_t) = \frac{1}{1 + \theta_1 T_t + \theta_2 T_t^2} \quad (14)$$

che rappresenta la quota di PIL che resta una volta tenuto conto dei danni causati dal riscaldamento dell'atmosfera. Questa specificazione è divenuta standard

⁴⁹Cfr Nordhaus (1994).

⁵⁰Cfr. Pindyck (2022), capitolo 3.

negli MVI, dove $\Omega(T_t)$ appare come un fattore moltiplicativo della funzione di produzione, alla stessa stregua della produttività totale dei fattori.

Esiste un modo più semplice per esprimere la funzione di danno. Come indicato nell'equazione (8), la relazione tra concentrazione di CO_2 nell'atmosfera e temperatura è concava; quella tra temperatura e PIL, descritta dall'equazione (14), è invece convessa. Golosov, Hassler, Krusell e Tsyvinski⁵¹ notano che con le calibrazioni normalmente utilizzate la combinazione delle due funzioni implica un impatto (marginale) di variazioni della concentrazione di CO_2 sul PIL costante, che può essere approssimato da una relazione di questo tipo:

$$D(T(M_t)) = 1 - e^{-\gamma(M_t - M_0)} \quad (15)$$

dove il coefficiente γ assomiglia a un'elasticità, in quanto

$$\frac{1}{1 - D(T(M_t))} \frac{\partial D(T(M_t))}{\partial M_t} = \gamma \quad (16)$$

L'equazione (16) si basa su due approssimazioni:

1. la temperatura è trattata come se fosse funzione della concentrazione di biossido di carbonio nell'atmosfera, trascurando il fatto che l'oceano trattiene calore, che rilascia solo molto lentamente. L'argomento della funzione di danno in realtà non è $T(M_t)$, ma $T(M_t^\infty) = \frac{\eta}{\kappa - \chi} \frac{1}{\ln 2} \ln \frac{M_t}{M_0}$.
2. la forma funzionale di $D(T(M_t))$ è una semplificazione della formulazione più accurata suggerita da Nordhaus.

3.4.2 Un'alternativa: danni considerati come perdita di utilità

I danni indotti dall'aumento della temperatura sono normalmente espressi in termine di perdita di PIL, che equivale a una riduzione del consumo e quindi del benessere sociale; alternativamente è possibile ipotizzare che l'aumento della concentrazione di gas serra nell'atmosfera si traduca direttamente in una riduzione dell'utilità. Una soluzione di questo tipo potrebbe essere giustificata sulla base dell'effetto negativo dei cambiamenti climatici sulla salute o sulla qualità della vita. La funzione di utilità sarebbe quindi del tipo seguente:

$$\tilde{u}(c_t, M_t) = u(c_t) - v(M_t - M_0) \quad (17)$$

⁵¹Cfr. Golosov *et al.* (2014)

dove $v(\cdot)$ è una funzione convessa. Il fatto che l'utilità dipenda dalla concentrazione dei gas serra (M_t) e non dalla temperatura (T_t) fa sì che non sia più necessario includere nel modello il sistema (10). $v(\cdot)$ può essere sia una funzione lineare sia una funzione potenza, ma è più conveniente specificare $v(\cdot)$ in modo tale che $v'(\cdot) = \gamma$, dove γ è definito come nella (16). Un vantaggio di questa specificazione è che la riduzione delle emissioni di gas serra sono tanto più apprezzate quanto più il tenore di vita della popolazione è elevato, come desumibile dal valore del rapporto tra l'utilità marginale derivante dalla riduzione delle emissioni e quella del consumo; se poi si ipotizza che $u(c_t) = \ln(c_t)$, si ha che $-\frac{\dot{u}_M}{\dot{u}_c} = \gamma c_t \propto \gamma y_t$, ovvero che la disutilità marginale di nuove emissioni – che corrisponde al costo sociale del carbonio – è proporzionale al PIL,⁵² come si ottiene nei modelli più tradizionali, in cui l'utilità dipende solo dal consumo.⁵³

4 Materie prime energetiche e rinnovabili

I modelli macroeconomici dedicano alle materie prime energetiche poca attenzione: in genere i loro prezzi, che rilevano perché contribuiscono a determinare l'inflazione, sono considerati variabili esogene e le quantità consumate vengono omesse. La ragione dello scarso peso attribuito alle materie prime energetiche è dovuto al fatto che esse costituiscono una frazione modesta, inferiore al 10%,⁵⁴ dei costi di produzione. I modelli di valutazione integrata sviluppano invece in modo più dettagliato il ruolo delle fonti di energia. La ragione è duplice: da un lato i combustibili fossili sono responsabili della maggior parte delle emissioni di gas serra; dall'altro la transizione energetica richiede il passaggio dalle fonti di energia inquinanti a quelle verdi, sostituzione che può essere accelerata con misure – come per esempio l'imposizione di una *carbon tax* o la vendita di diritti di emissione – che rendono il prezzo relativo dei combustibili fossili meno conveniente. Per entrambe le ragioni è necessario che gli MVI includano equazioni di domanda e offerta di un'ampia gamma di fonti di energia.

⁵²L'affermazione vale se si ipotizza che M_t , la concentrazione di gas serra nell'atmosfera, sia proporzionale alle emissioni E_t .

⁵³Cfr. la sezione 6.1.

⁵⁴Il dato si riferisce agli Stati Uniti. Cfr. Hassler, Krusell e Smith (2016), Fig. 1, che mostra che a partire dal secondo dopoguerra la quota dei costi di produzione attribuibile all'energia ha fluttuato attorno al 3%, con un picco del 6% agli inizi degli anni '80. Hassler e Krusell (2018) considerano invece la quota dell'energia rispetto al PIL (Fig. 20), che è più elevata, anche se quasi sempre ben inferiore al 10%, tranne che nel periodo immediatamente successivo al secondo shock petrolifero.

Modellare i combustibili fossili è complicato, perché le materie prime energetiche presentano caratteristiche disomogenee: petrolio⁵⁵ e gas naturale sono risorse finite, il cui prezzo in genere è molto superiore ai costi di produzione, mentre il carbone è disponibile in quantità pressoché illimitata,⁵⁶ è presente in tutte le principali aree geografiche e garantisce ricavi non molto superiori alle spese necessarie all'estrazione. Le condizioni di offerta di metano e petrolio sono quindi molto diverse da quelle del carbone, che, per quanto possa sembrare paradossale, dal punto di vista economico presenta somiglianze maggiori con le rinnovabili.

Negli MVI in genere le materie prime energetiche sono un argomento della funzione di produzione e la loro domanda è il risultato della minimizzazione del costo di produzione di una data quantità di output; nonostante l'energia venga utilizzata anche per finalità di consumo, si ipotizza normalmente che le materie prime energetiche siano impiegate esclusivamente nell'attività produttiva.⁵⁷ L'offerta, nel caso di risorse disponibili in quantità limitata, è determinata allineando al tasso di interesse reale la dinamica del loro prezzo (o dei profitti unitari), mentre nel caso di risorse inesauribili è pari alla quantità che uguaglia prezzo e costo marginale.

Come anche per capitale e lavoro, la quantità delle materie prime energetiche impiegata nella produzione è modellata come se fosse una funzione di domanda, mentre l'equazione del prezzo è specificata per riflettere le determinanti dell'offerta.

⁵⁵Il petrolio può essere ottenuto da fonti convenzionali o non convenzionali; nel primo caso l'estrazione avviene a basso costo attraverso trivellazioni ordinarie, mentre nel secondo richiede l'applicazione di tecniche speciali, che ne consentono la separazione dalle sabbie bituminose o dalle rocce di scisto in cui è intrappolato. In questo lavoro per petrolio si intende solo quello ottenuto da fonti convenzionali.

⁵⁶Hassler *et al.* (2018) riportano stime dell'IEA secondo cui le risorse di petrolio, misurate in termini di miliardi di tonnellate di carbonio, sarebbero pari a 300 GtC, quelle di gas naturale pari a 200 e quelle di carbone a 15000. Poiché il consumo complessivo di combustibili fossili ogni anno è mediamente pari a 10 GtC, per fini pratici le riserve di carbone possono essere considerate infinite.

⁵⁷A questa regola esistono eccezioni: il modello DICE-2007 per esempio non include l'energia né tra le variabili endogene né tra quelle esogene. La specificazione dell'equazione delle emissioni è quindi una forma ridotta, che fa dipendere dal PIL la quantità di gas serra immessa nell'atmosfera.

4.1 La domanda di energia⁵⁸

Consideriamo la seguente funzione di produzione: $y_t = F(k_t, A_t h_t, E_t)$, dove y è il prodotto; k e h rappresentano capitale e lavoro; A rappresenta le tecnologie che aumentano la produttività del lavoro; $E_t = g(E_t^p, E_t^c, E_t^g)$ è un aggregato di fonti di energia, tipicamente petrolio (p), carbone (c) ed energia rinnovabile (g).⁵⁹ E_t è un fattore di produzione indispensabile, perché in sua assenza l'output è nullo, ovvero $F(k_t, A_t h_t, 0) = 0$.

Per decidere qual è la forma funzionale più appropriata per $F(k_t, A_t h_t, E_t)$, Hassler e Krusell⁶⁰ considerano l'evidenza empirica per gli Stati Uniti, da cui ricavano due fatti stilizzati: il primo è che la quota dell'energia nei costi di produzione è stabile nel lungo termine, ma volatile nel breve periodo; il secondo è che il prezzo dell'energia e il suo peso nei costi di produzione sono molto correlati, chiaro indizio che la domanda di energia è inelastica rispetto a variazioni del prezzo. È quindi appropriato considerare una funzione di produzione di tipo Cobb-Douglas⁶¹ - ovvero $F(k_t, A_t h_t, E_t) = k_t^{\alpha_1} (A_t h_t)^{\alpha_2} E_t^{1-\alpha_1-\alpha_2}$ - quando l'unità di tempo del modello è il decennio, mentre conviene fare ricorso a una Leontief⁶² - ovvero $F(k_t, A_t h_t, E_t) = \min[k_t^{\alpha_1} (A_t h_t)^{1-\alpha_2}, E_t]$ - quando invece la frequenza considerata è quella annuale.

Ipotizzando quindi che la funzione di produzione sia di tipo Cobb-Douglas, la domanda di energia sarà quella che rende proporzionale produttività marginale e prezzo:

$$(1 - \alpha_1 - \alpha_2) \frac{y_t}{E_t} = \frac{1}{\mu} p_t^E \quad (18)$$

dove p_t^E è il prezzo dell'aggregato di fonti energetiche e $\frac{\partial y_t}{\partial E_t} = (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \frac{y_t}{E_t}$ è la sua produttività marginale. $\mu = 1$ se le imprese operano in regime di concor-

⁵⁸In questa sezione e nelle successive si fa l'ipotesi che le diverse fonti di energia siano perfettamente sostituibili tra loro. Questa semplificazione è adottata nei modelli di Nordhaus, Hassler, Krusell e altri.

⁵⁹Se è necessario utilizzare capitale e lavoro per disporre delle materie prime da cui è ottenuto E_t , k_t e h_t sono solo una parte dei fattori produttivi impiegati nell'economia.

⁶⁰Cfr. Hassler e Krusell (2018)

⁶¹Una funzione di tipo Cobb-Douglas ha la proprietà che la quota di costi attribuibile a ciascun fattore produttivo è costante, perché variazioni (percentuali) di prezzo vengono accompagnate da variazioni di pari ammontare, ma di segno opposto, nella quantità domandata. La quota di capitale, lavoro ed energia nel costo (minimo) di produzione (e rispetto all'output, nel caso di concorrenza perfetta) è pari al valore dell'esponente di ciascun fattore di produzione.

⁶²In una funzione di produzione di tipo Leontief non esiste sostituibilità tra fattori produttivi, che sono combinati in quantità non modificabili; il fattore produttivo più scarso è quindi quello che determina la quantità di output prodotto.

renza perfetta, mentre $\mu > 1$ se hanno potere monopolistico. Per semplificare, nel seguito si ipotizza che $\mu = 1$.

La (18) costituisce la condizione di equilibrio, perché qualora la produttività marginale fosse più elevata del prezzo diventerebbe conveniente intensificare l'uso di energia, mentre sarebbe vero il contrario se il segno della disuguaglianza fosse quello opposto.

Considerare l'aggregato delle fonti di energia, anziché le singole componenti, semplifica l'analisi senza alterarne la sostanza. Se infatti si assume che $E_t = g(E_t^p, E_t^c, E_t^g) = (E_t^p)^{\kappa_1} (E_t^c)^{\kappa_2} (E_t^g)^{(1-\kappa_1-\kappa_2)}$, la domanda di ciascuna delle materie prime energetiche è derivabile da una relazione pressoché identica alla (18). Nel caso del petrolio, per esempio, si ha:

$$(1 - \alpha_1 - \alpha_2)\kappa_1 \frac{y_t}{E_t^p} = p_t^p \quad (19)$$

dove E_t^p è la quantità di petrolio impiegata nella produzione e p_t^p è il suo prezzo. Equazioni analoghe si hanno per carbone e fonti rinnovabili.

4.2 L'offerta di energia

Dato che le materie prime energetiche differiscono tra loro in termini di disponibilità e costi di produzione, è opportuno distinguere le condizioni di offerta per il petrolio da quelle per il carbone e le fonti rinnovabili. Un'ulteriore utile semplificazione è quella di ipotizzare che esista soltanto una fonte di energia: il petrolio o il carbone. Il caso generale, in cui petrolio, carbone e rinnovabili coesistono, rappresenta una via di mezzo tra i due casi polari.

4.2.1 Una risorsa inesauribile: il carbone

Per risorse come il carbone, che sono disponibili in quantità pressoché illimitata, l'ipotesi più plausibile è che il prezzo sia pari al costo marginale che deve essere sostenuto per estrarle e poterle sfruttare: $p_t^c = mc_t^c$. Se $mc_t^c > 0$, è necessario utilizzare lavoro nell'attività estrattiva (h_t^c), che si somma alla quantità impiegata nella produzione del bene finale. In linea di principio, anche il capitale è necessario per lo sfruttamento del carbone, ma per semplificare si può ipotizzare che solo il lavoro sia necessario per la sua estrazione; Hassler, Krusell e Nycander⁶³ per esempio usano una funzione di produzione lineare nel solo fattore lavoro: $E_t^c = \chi_t h_t^c$, a cui corrisponde il costo marginale $mc_t^c = \frac{w_t}{\chi_t}$.

⁶³Cfr. Hassler *et al.* (2016a).

Le energie rinnovabili, che per definizione sono inesauribili, possono essere modellate in maniera analoga.

4.2.2 Una risorsa finita: il petrolio

Il fatto che le riserve di petrolio sono finite spiega perché il prezzo del greggio è molto superiore ai costi di estrazione, che in prima battuta possono essere considerati nulli. La rendita percepita da chi possiede giacimenti dipende dalla quantità venduta sul mercato: riversarne una quantità eccessiva è controproducente, perché ne abbassa il prezzo, oltre a ridurne la disponibilità in futuro; anche estrarne troppo poco non è conveniente, perché un prezzo troppo alto penalizza il consumo corrente a beneficio di quello futuro, meno importante per consumatori e produttori impazienti.

Il prezzo di equilibrio del petrolio, così come quello di altre riserve scarse e non riproducibili, è determinato da una condizione di arbitraggio, che eguaglia il rendimento delle diverse forme di risparmio. La forma più tipica di risparmio è l'investimento, che è remunerato sulla base della produttività marginale del capitale; una forma alternativa di risparmio è quella di procrastinare l'impiego di una risorsa scarsa come il petrolio, il cui rendimento è dato dalla variazione percentuale del prezzo.⁶⁴ Perché la remunerazione sia la stessa per entrambe le forme di risparmio, deve valere la relazione seguente:

$$\frac{p_{t+1}^p}{p_t^p} = \alpha_1 \frac{y_t}{k_t} = 1 + r_{t+1} \quad (20)$$

dove $\alpha_1 \frac{y_t}{k_t}$ è la produttività marginale del capitale e r_{t+1} il tasso di interesse reale.

L'equazione (20) è la cosiddetta formula di Hotelling, che per primo ha studiato l'economia delle risorse disponibili in quantità finita. Dato che in media r_{t+1} è positivo, la formula di Hotelling prescrive che p_t^p cresca a un ritmo pari al tasso di interesse reale e che il suo valore non dipenda dalla quantità di petrolio usata nella produzione (E_t^p). La domanda è invece rilevante per determinare il livello di p_t^p , che deve essere tale da consumare per intero le riserve disponibili.

Con piccole modifiche, la formula di Hotelling vale anche nel caso più realistico in cui i costi di estrazione non siano nulli. Se mc_t^p è il costo marginale che deve essere sostenuto per ottenere un'unità di petrolio, la (20) diventa:

⁶⁴Il prezzo a cui si fa riferimento è relativo, cioè rapportato all'indice generale dei prezzi; la sua variazione percentuale è quindi depurata dal tasso di inflazione.

$$\frac{p_{t+1}^p - mc_{t+1}^p}{p_t^p - mc_t^p} = 1 + r_{t+1} \quad (21)$$

L'ipotesi sottostante la (21) è che il costo marginale sia esogeno e non dipenda né dalla quantità estratta né da quella che resta da estrarre. La dinamica del prezzo in questo caso è più complicata e dipende da come si modifica nel tempo il costo marginale. Riarrangiando l'equazione precedente si ottiene la seguente relazione:

$$\frac{p_{t+1}^p}{p_t^p} = 1 + r_{t+1} + \frac{1}{p_t^p} [mc_{t+1}^p - (1 + r_{t+1})mc_t^p] \quad (22)$$

da cui si evince che il prezzo cresce più del tasso di interesse reale se i costi marginali aumentano a un ritmo superiore a r_{t+1} .

Come varia nel tempo mc_t^p ? È ragionevole pensare che il costo marginale di una risorsa finita cresca in funzione della quantità estratta: inizialmente vengono sfruttati i giacimenti più in superficie, che forniscono un prodotto di maggior qualità e più facile da raffinare; successivamente si fa ricorso a trivellazioni in mare o perforazioni idrauliche di strati rocciosi che contengono idrocarburi, ottenendo un prodotto che richiede maggiori costi di estrazione o di raffinazione. Il costo marginale è quindi crescente e accelera all'aumentare della quantità di petrolio estratta. Un'equazione con queste caratteristiche è la seguente:

$$mc_t^p = \chi_1 + \chi_2 \left(\frac{\sum_{j=t_0}^t E_j^p}{CumC} \right)^{\chi_3} \quad (23)$$

dove $CumC$ rappresenta il livello critico di risorse estratte superato il quale i costi accelerano rapidamente e $\chi_3 > 1$.⁶⁵

Conoscendo come varia nel tempo il prezzo, è possibile derivare la dinamica della domanda di petrolio E_t^p e risolvere il problema di quale sia il modo migliore per consumarne le riserve esistenti. A tal fine, è necessario combinare domanda e offerta, descritte rispettivamente dall'equazione (19) e (20).⁶⁶

Il membro di sinistra della formula di Hotelling può essere riscritto in questo modo:

⁶⁵L'equazione (23) è una semplificazione: il costo marginale dovrebbe più correttamente essere espresso in funzione dei prezzi dei fattori di produzione impiegati per l'estrazione del petrolio; anche la quantità estratta sarebbe rilevante in caso di funzione di costo convessa, come nel caso dell'equazione sopra citata.

⁶⁶Nella dimostrazione che segue si ipotizza *perfect foresight*, ovvero che aspettative ($\hat{E}_t p_{t+j}, \hat{E}_t E_{t+j}^p, \dots$) e realizzazioni ($p_{t+j}, E_{t+j}^p, \dots$) coincidano, dove \hat{E}_t indica l'aspettativa di una generica variabile formata sulla base delle informazioni disponibili al tempo t .

$$\frac{p_{t+1}^p}{p_t^p} = \frac{(1 - \alpha_1 - \alpha_2)\kappa_1 y_{t+1}/E_{t+1}^p}{(1 - \alpha_1 - \alpha_2)\kappa_1 y_t/E_t^p} = \frac{y_{t+1}}{y_t} \frac{E_t^p}{E_{t+1}^p} \quad (24)$$

Per quel che riguarda invece la parte destra dell'equazione, facendo uso della condizione di Eulero⁶⁷ $u(c_t) = \beta(1 + r_{t+1})u(c_{t+1})$ e ipotizzando che la funzione di utilità sia di tipo logaritmico, si ottiene:

$$\frac{p_{t+1}^p}{p_t^p} = 1 + r_{t+1} = \frac{u(c_t)}{\beta u(c_{t+1})} = \frac{c_{t+1}}{\beta c_t} = \frac{(1-s)y_{t+1}}{\beta(1-s)y_t} = \frac{y_{t+1}}{\beta y_t} \quad (25)$$

dove le ultime due uguaglianze sfruttano il fatto che (i) il consumo è pari al reddito al netto del risparmio, (ii) il risparmio è dato dal prodotto tra propensione al risparmio e reddito e (iii) la propensione al risparmio è costante.⁶⁸

Unendo le equazioni (24) e (25) si ottiene:

$$\frac{E_t^p}{E_{t+1}^p} = \frac{1}{\beta} \Rightarrow E_{t+1}^p = \beta E_t^p \quad (26)$$

Poiché il fattore di sconto β è inferiore a 1, il consumo di petrolio diminuisce ininterrottamente in ogni periodo, seguendo una traiettoria esponenziale; inoltre il tasso di esaurimento delle riserve è indipendente dalla loro dimensione.

Se le scorte di materia prima disponibile al tempo t sono pari a R_t , è possibile derivare dalla (26) la quantità offerta, che deve essere tale da consentire asintoticamente l'esaurimento dei giacimenti, ovvero: $R_t = \sum_{j=0}^{+\infty} E_{t+j}^p = E_t^p \sum_{j=0}^{+\infty} \beta^j$, da cui deriva

$$E_t^p = R_t(1 - \beta) \quad (27)$$

In alcuni periodi l'impiego di petrolio può crescere, anziché ridursi, se R_t sale, a causa per esempio del rinvenimento di nuovi giacimenti.

Poiché il petrolio è un fattore di produzione indispensabile, ridurne l'utilizzo di periodo in periodo ha conseguenze importanti per l'attività economica. In un sentiero di crescita bilanciata il capitale cresce allo stesso tasso g dell'output, che dipende da quello del progresso tecnico A_t (g_A) e degli altri fattori produttivi,

⁶⁷L'equazione di Eulero è condizione necessaria perché il consumatore massimizzi la sua utilità intertemporale. Essa indica che l'utilità $u(c_{t+1})$ ottenuta da un'unità di reddito risparmiata nel periodo precedente è identica a quella che si avrebbe se quel reddito fosse consumato, anziché risparmiato ($u(c_t)$). Il parametro β nell'equazione di Eulero consente di confrontare utilità in periodi diversi

⁶⁸In un modello con utilità logaritmica, funzione di produzione di tipo Cobb-Douglas e 100% di deprezzamento del capitale, la propensione al risparmio è costante.

lavoro e input energetico. Se la quantità di lavoro è stabile nel tempo⁶⁹ e la funzione di produzione è di tipo Cobb-Douglas – $y_t = k_t^{\alpha_1} (A_t h_t)^{\alpha_2} (E_t^p)^{1-\alpha_1-\alpha_2}$ – in equilibrio il tasso di crescita dell’economia è pari a:

$$g = g^{\alpha_1} g_A^{\alpha_2} \beta^{1-\alpha_1-\alpha_2} \quad \Rightarrow \quad g = g_A^{\frac{\alpha_2}{1-\alpha_1}} \beta^{\frac{1-\alpha_1-\alpha_2}{1-\alpha_1}} \quad (28)$$

che implica che la scarsità crescente di petrolio riduce il tasso di crescita di equilibrio dell’output e può addirittura portare alla progressiva contrazione (e asintoticamente alla scomparsa) dell’economia, se il tasso di crescita del progresso tecnico è nullo o solo marginalmente positivo.

Per quanto la formula di Hotelling e l’equazione (26) costituiscano una spiegazione coerente ed elegante di come una risorsa scarsa venga sfruttata e valutata, hanno il difetto di fornire previsioni in contrasto con l’evidenza empirica. Sulla base delle serie storiche a disposizione, il prezzo (reale) del petrolio e delle altre materie prime non riproducibili non è sistematicamente aumentato, ma ha piuttosto fluttuato attorno a un trend, ascendente o discendente a seconda del periodo o della risorsa considerata; la quantità impiegata di tutte le materie prime non è sistematicamente diminuita, ma al contrario è aumentata senza quasi soluzione di continuità.

Esistono diverse ragioni che possono essere addotte per giustificare l’incapacità della teoria di spiegare la realtà. Innanzitutto il modello di Hotelling ipotizza che sia nota e certa la quantità di riserve a disposizione, che siano tutte della stessa qualità e che modalità e costi di estrazione siano costanti nel tempo. Inoltre, dato che gli esiti della ricerca di nuovi giacimenti sono imprevedibili, le aspettative che si formano sull’ammontare delle riserve variano nel tempo in entrambe le direzioni, generando volatilità nei prezzi; in aggiunta, poiché l’offerta dipende dal capitale investito ed è inelastica nel breve termine, variazioni della domanda si riflettono in aggiustamenti dei prezzi, anziché delle quantità, generando ulteriore volatilità.⁷⁰ Infine, aumenti dei prezzi incentivano lo sviluppo e l’adozione di tecnologie per il risparmio energetico, che hanno lo stesso effetto di un ampliamento delle riserve esistenti.⁷¹

⁶⁹Dire che in un equilibrio di crescita bilanciata la quantità di lavoro è stabile equivale a dire che il tasso di crescita della popolazione è nullo.

⁷⁰Cfr. Krautkraemer (1998).

⁷¹L’equazione (20) e le successive sono state derivate sotto l’ipotesi esemplificativa di assenza di incertezza, in cui aspettative e realizzazioni delle variabili coincidono. Nel caso più realistico di incertezza, la disponibilità di petrolio dovrebbe garantire un rendimento superiore a quello del tasso privo di rischio: la variabilità della componente di remunerazione per il rischio è un altro fattore che potrebbe spiegare le deviazioni del prezzo effettivo da quello teorico.

5 Progresso tecnico e risparmio di energia

Oltre a una ridotta capacità di replicare l'andamento effettivo del prezzo e della quantità consumata di petrolio (o metano), il modello di Hotelling ha anche altre implicazioni poco convincenti: innanzitutto quella secondo cui la crescente scarsità di riserve avrebbe un impatto negativo sulla dinamica del consumo; in secondo luogo quella per cui una quota crescente di valore aggiunto andrebbe a remunerare l'uso di materie prime energetiche.

5.1 Il modello di Hassler, Krusell e Olovsson

Hassler, Krusell e Olovsson⁷² mostrano che lo sviluppo e l'adozione di tecnologie per il risparmio energetico possono rendere il modello descritto nella sezione precedente più aderente alla realtà. La reazione del mercato alla scarsità di un bene è quella di aumentarne il prezzo, che a sua volta riduce la domanda e aumenta l'offerta, favorendo la convergenza a un nuovo equilibrio. Se però esiste un modo per rendere più efficiente l'uso del bene in questione, la cui introduzione è resa possibile (o conveniente) dall'aumento del prezzo, allora la risposta del mercato è differente: tecnologie che consentono il risparmio di materie prime energetiche scarse equivalgono alla scoperta di nuovi giacimenti e quindi ne consentono per periodi prolungati di tempo un uso crescente, modificandone anche il prezzo.

La prima parte del lavoro di Hassler, Krusell e Olovsson è dedicata a verificare se nei dati relativi all'economia degli Stati Uniti esiste evidenza empirica a sostegno di questa tesi. La difficoltà principale è quella di ricavare stime del progresso tecnico *energy-saving*, che è una variabile inosservabile.

L'approccio adottato da Hassler e soci è lo stesso utilizzato per stimare la produttività totale dei fattori e consiste nel fare ricorso a una funzione di produzione. Data la scarsa sostituibilità nel breve periodo tra energia da un lato e capitale e lavoro dall'altro, la funzione di produzione non può essere una Cobb-Douglas, ma deve essere simile, anche se non identica, a una Leontief. La scelta degli autori è un compromesso tra le due forme funzionali:

$$y_t \equiv F(k_t, A_t h_t, A_{e,t} E_t) = \left[(A_t k_t^\alpha h_t^{1-\alpha})^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} + (A_{e,t} E_t)^{\frac{\epsilon-1}{\epsilon}} \right]^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}} \quad (29)$$

dove $A_{e,t}$ rappresenta la produttività di ciascuna unità di energia e il parametro ϵ misura l'elasticità di sostituzione tra i due argomenti della funzione

⁷²Cfr. Hassler Krusell e Olovsson (2021) e (2023).

di produzione:⁷³ energia⁷⁴ e un mix capitale-lavoro.⁷⁵ Per essere in grado di approssimare adeguatamente la correlazione tra prezzo e quota dell'energia nei costi di produzione, a ϵ è assegnato un valore positivo, ma prossimo a zero.⁷⁶

Il passo successivo è quello di usare la funzione di produzione per stimare A_t e $A_{e,t}$, le uniche due variabili inosservabili che compaiono nella (29). Per essere utilizzabile, la funzione di produzione deve però essere trasformata, perché compaia solo una delle due variabili incognite; il modo più immediato per farlo è rielaborare le condizioni del primo ordine per la minimizzazione dei costi,⁷⁷ ovvero l'uguaglianza tra produttività marginale e costo del fattore. A_t e $A_{e,t}$ possono quindi essere espresse in funzione di variabili osservabili nel modo seguente:

$$A_t = \frac{y_t}{k_t^\alpha h_t^{1-\alpha}} \left[\frac{l_t^{sh}}{1-\alpha} \right]^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}} \quad A_{e,t} = \frac{y_t}{E_t} [E_t^{sh}]^{\frac{\epsilon}{\epsilon-1}} \quad (30)$$

dove $l_t^{sh} \equiv \frac{h_t w_t}{y_t}$ e $E_t^{sh} \equiv \frac{E_t p_t^E}{y_t}$ sono le quote di lavoro ed energia sul valore aggiunto. Le serie storiche utilizzate, che si riferiscono agli Stati Uniti, coprono il periodo successivo alla Seconda Guerra Mondiale.

Le stime di A_t e $A_{e,t}$ presentano caratteristiche coerenti con quelle auspicabili per serie che rappresentano il progresso tecnico: sono non decrescenti (perché fasi di regresso non sembrano plausibili) e hanno un profilo poco volatile e privo di discontinuità (perché l'applicazione nella produzione delle innovazioni richiede tempo).

⁷³Per l'elasticità di sostituzione vale la diseuguaglianza: $0 \leq \epsilon < \infty$. Al valore $\epsilon = 0$ corrisponde una funzione di produzione Leontief, che non consente sostituibilità tra fattori produttivi, mentre quando $\epsilon \rightarrow \infty$ si ha una funzione di produzione lineare, in cui nessun fattore è indispensabile. La funzione Cobb-Douglas è un caso particolare, che si ottiene quando $\epsilon = 1$.

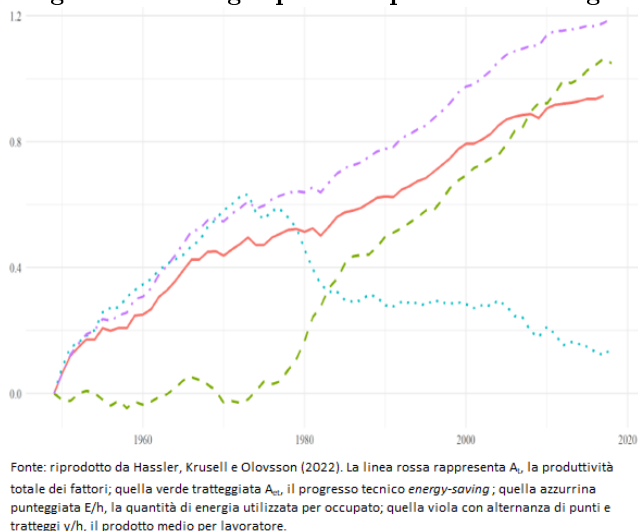
⁷⁴Come misura dell'input energetico Hassler, Krusell e Olovsson considerano un aggregato di carbone, petrolio e gas naturale.

⁷⁵Capitale e lavoro (e produttività totale dei fattori) sono aggregati tramite una funzione di tipo Cobb-Douglas.

⁷⁶Hassler *et al.* usano il valore 0,02 per l'elasticità di sostituzione ϵ . L'altro parametro incognito che compare nella funzione di produzione (α) è invece posto pari a 0,26.

⁷⁷Per semplificare, viene fatta l'ipotesi di concorrenza perfetta nel mercato dei fattori di produzione; secondo gli autori l'ipotesi non è restrittiva e i risultati non cambierebbero considerando un regime di concorrenza monopolistica, con mark-up costante. La ragione è che l'obiettivo dell'analisi non è quello di stimare valori puntuali, ma serie storiche, per capire come A_t e $A_{e,t}$ variano nel tempo e interagiscono tra loro: differenze di livello nelle traiettorie delle due variabili sono trascurabili, perché non alterano i risultati dell'analisi.

Fig. 2: Tecnologie per il risparmio di energia



Dall'analisi del loro andamento Hassler e i suoi coautori ritengono di potere desumere alcune evidenze consolidate:

- ◇ ciascuna delle due serie presenta episodi di forte accelerazione; quelle di $A_{e,t}$ sono chiaramente connesse a periodi di prezzi dell'energia elevati, come quelli che hanno fatto seguito ai due shock petroliferi del 1973 e 1979. L'introduzione di tecnologie che riducono la quantità di energia impiegata per produrre una data quantità di output si configura quindi come il tentativo di fare un uso più efficiente di una risorsa costosa e scarsa;
- ◇ fino agli inizi degli anni '70 la quantità di energia utilizzata per occupato cresce a un ritmo sostenuto, così come la produttività totale dei fattori; dopo il primo shock petrolifero il trend di E_t/h_t si inverte e A_t rallenta. Secondo Hassler e i suoi coautori questi andamenti mostrano che nella prima parte del campione era il capitale il fattore scarso, mentre l'energia era abbondante e usata senza timori di esaurimento delle riserve;
- ◇ $\frac{A_{e,t}E_t}{y_t}$, il rapporto tra energia in unità di efficienza e occupati (non incluso nella Figura 2), cresce stabilmente, in linea con l'aumento dell'output;
- ◇ nel medio termine A_t e $A_{e,t}$ presentano una correlazione negativa, che suggerisce che le tecnologie per aumentare la produttività del lavoro e dell'energia sono in competizione tra loro, per cui la scelta di quale privi-

legiare dipende dall'andamento dei prezzi relativi e, più in generale, dalle condizioni economiche.

Un modo semplice per replicare la correlazione negativa tra A_t e $A_{e,t}$ è quello di ipotizzare che nell'economia ci sia una quantità data di risorse – per esempio un numero fisso di ricercatori o un ammontare limitato di investimenti – che possono essere impiegati per sviluppare tecniche che aumentano la produttività del lavoro oppure, alternativamente, per scoprire modi per economizzare l'uso di energia: se si punta a rendere più produttivo il lavoro, si sottraggono risorse che sarebbero altrimenti destinate a rendere più efficiente l'utilizzo delle materie prime energetiche; se si cerca di economizzare l'impiego di energia, si riduce la possibilità per il lavoro di generare più output. Questa interazione tra A_t e $A_{e,t}$ viene modellata aggiungendo al modello la seguente coppia di equazioni:

$$\begin{aligned} A_{t+1}/A_t &= f(z_{A_t}, n_t) = e^{z_{A_t}} (1 + Bn_t^\phi) \\ A_{e,t+1}/A_{e,t} &= f_e(z_{A_{e,t}}, 1 - n_t) = e^{z_{A_{e,t}}} (1 + B_e(1 - n_t)^\phi) \end{aligned} \quad (31)$$

dove z_{A_t} e $z_{A_{e,t}}$ sono shock idiosincratici, il parametro ϕ è inferiore all'unità e la risorsa scarsa dedicata alla ricerca è normalizzata a 1, con n_t la quota dedicata a fare accelerare la produttività totale dei fattori (A_t).

Poiché n_t non è osservabile, Hassler, Krusell e Olovsson usano la prima equazione in (31) per eliminarlo dal seconda, che si trasforma quindi in una relazione tra il tasso di crescita di A_t e quello di $A_{e,t}$. Questa equazione viene poi usata, insieme alle altre, per stimare i parametri del modello e derivare le proprietà dinamiche e di lungo periodo delle variabili di interesse.

L'equilibrio di lungo periodo dell'economia descritta dal modello è caratterizzato da un tasso di crescita costante degli aggregati $A_t k_t^\alpha$ e $A_{e,t} E_t$; ⁷⁸ l'energia impiegata tende invece a ridursi progressivamente e nel caso di funzione di utilità logaritmica il suo profilo intertemporale è pari a $E_{t+1}/E_t = \beta$, come nel modello di Hotelling. La quota dei combustibili fossili nei costi di produzione è costante e non raggiunge il livello del 10%.

Al di fuori del sentiero di crescita bilanciata il consumo di energia è invece molto più simile a quanto si riscontra nella realtà e può crescere anche per decenni prima di iniziare a ridursi, se il fattore scarso è inizialmente il capitale. Il progresso tecnico è guidato dai segnali che provengono dai prezzi e tende quindi a rendere più efficiente l'impiego del fattore relativamente più costoso. Il tasso di

⁷⁸Per ipotesi in equilibrio l'occupazione è costante e quindi non contribuisce al tasso di crescita del mix capitale-lavoro.

crescita del prezzo dell'energia è inizialmente elevato e tende progressivamente a diminuire, in linea con l'andamento della produttività marginale del capitale, alta quando il capitale è scarso e bassa quando invece diventa relativamente abbondante. La formula di Hotelling è quindi pienamente rispettata: il prezzo decelera perché il tasso di interesse reale si riduce.

La soluzione di Hassler, Krusell e Olovsson riesce quindi a riallineare all'evidenza empirica le previsioni degli MVI, anche se al costo di complicazioni addizionali. Un approccio simile, ma più semplice, è adottato nel modello WITCH,⁷⁹ che ipotizza che l'investimento in ricerca e sviluppo consenta l'accumulazione di conoscenze che accrescono il contributo alla produzione dei servizi forniti dalla materie prime energetiche. L'equazione utilizzata è simile alla legge del moto del capitale:

$$A_{e,t+1} = (1 - \delta_{RD})A_{e,t} + h(I_{RD,t}) \quad (32)$$

dove δ_{RD} è il tasso di obsolescenza della conoscenza, $I_{RD,t}$ l'investimento in ricerca e sviluppo e $h(\cdot)$ una funzione che coglie i rendimenti decrescenti della conoscenza.

5.2 Il paradosso verde

'Paradosso verde' (*Green Paradox*) è il termine coniato da Sinn⁸⁰ per indicare un effetto contro-intuitivo degli incentivi alle tecnologie di energia verde: destinare risorse pubbliche alla ricerca di fonti di energia "pulita" può comportare nel breve periodo non una riduzione, ma un aumento delle emissioni di gas serra.

Se producono risultati, i sussidi allo sviluppo di fonti di energia verde possono contribuire ad accelerare la transizione energetica, favorendo la sostituzione dei combustibili fossili con alternative non inquinanti. Gli effetti di lungo periodo sono quindi certamente positivi, ma quelli più immediati sono di segno opposto, perché spingono i produttori di combustibili fossili a riversare sul mercato quantità molto maggiori di petrolio, metano e carbone, nel tentativo di esaurire prima possibile le riserve, destinate a perdere di valore in presenza di alternative pulite.

Il meccanismo che genera il paradosso verde può essere mostrato partendo dalle equazioni di domanda e offerta di petrolio, rispettivamente la (19) e la (27).

⁷⁹Cfr. Bosetti *et al.* (2006).

⁸⁰Cfr. Sinn (2008).

In assenza di sussidi allo sviluppo di tecnologie di energia verde, l'equilibrio di mercato sarebbe caratterizzato dalla relazione seguente:

$$p_t^p = \mu(1 - \alpha_1 - \alpha_2)\kappa_1 \frac{y_t}{R_t(1 - \beta)} \quad (33)$$

Qualora invece venissero introdotti sussidi, che per ipotesi consentissero di ottenere in $t + 1$ una fonte di energia pulita,⁸¹ l'equilibrio di mercato in t presenterebbe la seguente combinazione di prezzo e quantità:

$${}^s p_t^p = \mu(1 - \alpha_1 - \alpha_2)\kappa_1 \frac{y_t}{R_t} \quad (34)$$

dove ${}^s p_t^p$ è il prezzo del petrolio in presenza di sussidi (e ${}^s E_t^p$ la quantità domandata corrispondente). A denominatore compare R_t anziché $R_t(1 - \beta)$ perché i produttori cercherebbero di sbarazzarsi di tutte le riserve di petrolio, che sarebbero prive di valore nel periodo successivo.

Si avrebbe quindi che ${}^s p_t^p < p_t^p$ e ${}^s E_t^p = R_t > R_t(1 - \beta) = E_t^p$: un prezzo più basso determinerebbe un aumento della domanda di petrolio e si tradurrebbe quindi in maggiori emissioni. Dal periodo successivo la disponibilità pressoché illimitata e a basso costo di energia verde renderebbe obsolete le altre fonti; si avrebbe quindi che ${}^s E_j^p = 0$ da $t + 1$ in poi e le emissioni di gas serra si azzererebbero. I sussidi allo sviluppo di fonti di energia verde avrebbero quindi un effetto inizialmente negativo, che diverrebbe però positivo nel medio-lungo periodo.

6 Il costo sociale delle emissioni di gas serra

Secondo il primo teorema dell'economia del benessere l'equilibrio che si forma in un'economia decentrata è efficiente in senso Paretiano se (i) esiste un mercato per tutti i beni che arrecano utilità ai consumatori o vengono usati nella produzione e (ii) tutti i mercati sono competitivi. Non è quindi possibile per il governo migliorare l'allocazione delle risorse e usare le leve della politica economica per aumentare l'utilità di alcuni individui senza ridurre quella di altri.

Esistono però casi in cui le condizioni su cui si basa il primo teorema dell'economia del benessere non sono soddisfatte. Vi sono per esempio mercati che

⁸¹Un periodo per gli MVI corrisponde in genere a 10 anni: l'ipotesi è quindi meno estrema di quanto possa sembrare. Si assume inoltre che la quantità di energia verde disponibile a partire da $t + 1$ sia più che sufficiente a soddisfare le esigenze della produzione e abbia un prezzo competitivo.

sono dominati da monopolisti ed esistono beni pubblici che, a differenza di quelli privati, possono essere consumati da più soggetti contemporaneamente o di cui può godere anche chi non ha pagato per averli. Non sono poi infrequenti casi di esternalità, ovvero situazioni in cui le azioni di un soggetto possono influenzare – in positivo o negativo – altri, senza che chi le compie riceva un beneficio o paghi una penalità. Nel primo caso è violata la condizione (ii); negli altri la (i).⁸²

Un tratto comune di questi fallimenti del mercato è che sono riconducibili a un insieme limitato di cause: un’allocazione imperfetta dei diritti di proprietà; la presenza di costi che superano i benefici di una transazione; ignoranza dell’esistenza di potenziali controparti in una negoziazione; informazione incompleta sulla qualità dei beni scambiati.

I cambiamenti climatici costituiscono un’esternalità indotta dalle emissioni di CO_2 nell’atmosfera: le imprese che usano combustibili fossili nella produzione o le famiglie che consumano metano per il riscaldamento dell’abitazione non tengono conto dei danni che le loro azioni causano agli altri, danni che sono la conseguenza dell’aumento delle temperature, dell’innalzamento del livello delle acque o di fenomeni meteorologici estremi. Le emissioni incontrollate di biossido di carbonio sono il risultato del disallineamento tra costi privati, sostenuti da chi decide di impiegare combustibili fossili, e quelli sociali, che gravano sull’intera collettività. Ciò che rende i danni provocati dai cambiamenti climatici ancora più gravosi e difficili da neutralizzare è che essi interessano non aree circoscritte, ma l’intero pianeta. Il disallineamento tra costi privati e pubblici crea inefficienza e giustifica l’intervento dei governi, che però è complicato dalla necessità di trovare forme di coordinamento a livello internazionale, data la natura globale del problema della mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.

Le esternalità indotte dalle emissioni di CO_2 sono un esempio di fallimento del mercato, che può essere superato sia introducendo tasse che aumentano il costo dell’uso di fonti di energia inquinanti sia imponendo limiti quantitativi alle emissioni di gas serra. Nel primo caso il riferimento teorico obbligato è a Pigou;⁸³ nel secondo a Coase.⁸⁴

⁸²Per un’analisi più approfondita dell’economia del benessere e delle esternalità, cfr. Gravelle e Rees (2004).

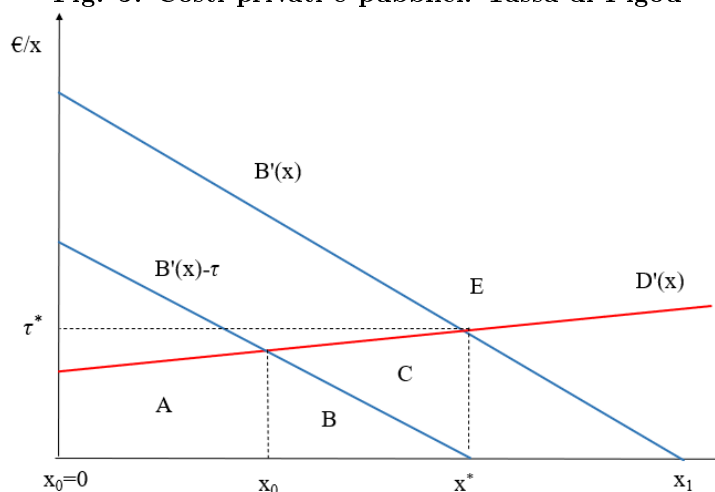
⁸³Cfr. Pigou (1920).

⁸⁴Cfr. Coase (1960).

6.1 Esternalità e tasse à la Pigou

Un esempio può aiutare a capire perché la presenza di un'esternalità crea i presupposti perché si realizzi un equilibrio inefficiente. Supponiamo che una fabbrica di prodotti chimici riversi sostanze tossiche in un fiume che scorre nelle vicinanze; a valle del corso d'acqua è situata un'azienda agricola, la cui produzione è danneggiata dall'inquinamento del fiume.⁸⁵ Sia $B(x)$ la funzione che misura il beneficio per la fabbrica di prodotti chimici di emettere la quantità x di residui tossici e $D(x)$ il danno che ne deriva all'azienda agricola:⁸⁶ se non esistono provvedimenti che impediscono o limitano l'inquinamento delle acque, la fabbrica si libererà di una quantità di sostanze tossiche pari a x_1 , che corrisponde al valore in cui il beneficio marginale è pari a zero (cfr. Figura 3).⁸⁷ A fronte di vantaggi per l'impresa inquinante vi è però il danno sopportato dall'azienda agricola, che è misurato da $D(x)$, che a sua volta è pari all'area sottostante la curva $D'(x)$ nella Figura 3. Un equilibrio efficiente si avrebbe invece nel punto E , che corrisponde al livello di inquinamento x^* , dove danno e beneficio marginale sono uguali: $B'(x^*) = D'(x^*)$.

Fig. 3: Costi privati e pubblici. Tassa di Pigou



⁸⁵Per ipotesi, nessun altro – produttore o consumatore – è danneggiato dalle azioni della fabbrica di prodotti chimici.

⁸⁶ $B(x)$ è per ipotesi crescente e concava, ovvero aumenta sempre meno, mentre $D(x)$ è crescente e convessa, ovvero aumenta più che proporzionalmente rispetto a x ; entrambe sono inoltre funzioni continue e differenziabili.

⁸⁷Per $x < x_1$ infatti $B'(x) > 0$ e la fabbrica avrebbe convenienza a inquinare di più, mentre dovrebbe fare il contrario nel caso in cui $x > x_1$, perché il beneficio marginale sarebbe negativo.

L'intervento del governo può consentire di eliminare l'inefficienza, imponendo una tassa unitaria τ su x , pari al costo marginale $D'(x^*)$ sostenuto dall'azienda agricola in corrispondenza del punto di equilibrio E ; in questo caso il beneficio per l'impresa inquinante diventerà pari a $B(x) - \tau x = B(x) - D'(x^*)x$ e il valore di x che ne massimizza il profitto sarà quello per cui $B'(x) - \tau = B'(x) - D'(x^*) = 0$, ovvero $x = x^*$. Una tassa di questo tipo, finalizzata a correggere gli effetti di esternalità negative, è denominata tassa di Pigou o pigouviana.

I proventi della tassa possono poi essere utilizzati per compensare l'azienda agricola dei danni subiti dall'inquinamento del fiume: il gettito τx^* è più che sufficiente a tal fine, come si vede dalla Figura 3, in quanto risulta superiore all'area $A+B+C$, che misura il costo $D(x^*)$. Dalla combinazione di tasse e sussidi il governo riesce a ottenere un triplo vantaggio: (i) costringe il soggetto inquinante a compensare quello danneggiato; (ii) rimuove la convenienza delle parti a trovare un accordo privato per spostare l'equilibrio in x_0 , che ridurrebbe il gettito della tassa e determinerebbe un livello subottimale di inquinamento;⁸⁸ (iii) incamera la parte del gettito τx^* che non è usata per compensare l'azienda agricola.

Una tassa pigouviana può essere utilizzata anche per controllare le emissioni di biossido di carbonio:⁸⁹ se applicata alle fonti di energia inquinanti può far sì che il loro prezzo incorpori anche un corrispettivo per i danni provocati dalle emissioni di gas serra, riallineando costi privati e costi sociali. Per ottenere gli effetti desiderati, la tassa deve essere calcolata tenendo conto che le emissioni rimangono a lungo nell'atmosfera e quindi causano danni per un periodo di tempo prolungato, potenzialmente infinito.

La tassa ottimale t_t^* è quindi definibile nel modo seguente:

$$t_t^* = - \sum_{j=0}^{\infty} \underbrace{\beta^j \frac{u'(c_{t+j})}{u'(c_t)}}_{\text{fattore di sconto}} \times \underbrace{\frac{\partial y_{t+j}}{\partial M_{t+j}}}_{\text{danni dovuti all'aumento dei gas serra}} \times \underbrace{\frac{\partial M_{t+j}}{\partial E_t}}_{\text{CO}_2 \text{ emessa che resta a lungo nell'atmosfera}} \quad (35)$$

⁸⁸Se il governo si limitasse a imporre una tassa, senza compensazione per l'azienda danneggiata, le due parti avrebbero la convenienza a trovare un accordo, per spostare l'equilibrio nel punto x_0 : l'azienda agricola potrebbe offrire alla controparte un compenso pari all'area $B+\epsilon$ (con ϵ appena superiore a zero e nell'ipotesi che la proposta possa solo essere accettata o rifiutata, senza possibilità di contrattazione), incamerando un guadagno pari all'area $C-\epsilon$; la fabbrica di prodotti chimici avrebbe tutta la convenienza ad accettare, riducendo le emissioni di prodotto tossici fino a x_0 , livello inferiore a quello ottimale. Nel punto x_0 infatti $B'(x_0) > D'(x_0)$, per cui sarebbe socialmente conveniente aumentare il rilascio di prodotti tossici fino a x^* .

⁸⁹Una tassa disegnata per penalizzare le emissioni di biossido di carbonio è normalmente denominata con il termine inglese *carbon tax*.

ovvero è pari alla somma scontata dei danni futuri, espressi in termini di perdita di PIL, dovuti all’impatto delle emissioni odierne sulla concentrazione di biossido di carbonio nell’atmosfera in tutti i periodi a partire da quello corrente. Poiché t_t^* deve essere positivo, è necessario premettere alla sommatoria il segno meno per neutralizzare il valore negativo della derivata parziale $\frac{\partial Y_{t+j}}{\partial M_{t+j}}$.

L’equazione (35) può essere notevolmente semplificata. Consideriamo uno per volta i tre fattori da cui dipende t_t^* . Se si fa l’ipotesi che la funzione di utilità sia logaritmica, il fattore di sconto può essere semplificato nel modo seguente:

$$\beta^j \frac{u'(c_{t+j})}{u'(c_t)} = \beta^j \frac{c_t}{c_{t+j}} = \beta^j \frac{(1-s)y_t}{(1-s)y_{t+j}} = \beta^j \frac{y_t}{y_{t+j}} \quad (36)$$

Per quel che riguarda il termine che esprime la perdita di PIL dovuta ai gas serra, dalla (15) si deriva immediatamente che $\frac{\partial y_{t+j}}{\partial M_{t+j}} = -\gamma y_{t+j}$. Infine, dall’equazione (4), segue che $\frac{\partial M_{t+j}}{\partial E_t} = 1 - d(j) = [\phi_L + (1 - \phi_L)\phi_0(1 - \phi)^j]$.

L’equazione della tassa di Pigou può perciò essere semplificata nel modo seguente:

$$\begin{aligned} t_t^* &= - \sum_{j=0}^{\infty} \beta^j \frac{y_t}{y_{t+j}} (-\gamma y_{t+j}) [\phi_L + (1 - \phi_L)\phi_0(1 - \phi)^j] \\ &= \gamma y_t \left(\frac{\phi_L}{1-\beta} + \frac{\phi_0(1-\phi_L)}{1-(1-\phi)\beta} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

t_t^* è quindi funzione del PIL corrente e dei parametri che misurano la permanenza della CO_2 nell’atmosfera e l’entità dei danni causati dai cambiamenti climatici; è invece indipendente dal progresso tecnico, dall’esistenza di fonti alternative di energia e dall’andamento futuro del PIL.

Il risultato meno intuitivo è l’irrelevanza del livello futuro di attività economica, visto che in ogni periodo i guasti dei cambiamenti climatici sono espressi in funzione del PIL: la spiegazione è che il PIL influenza in modi opposti il fattore di sconto ($\beta^j \frac{y_t}{y_{t+j}}$) e la funzione di danno ($-\gamma y_{t+j}$), cosicché il loro prodotto ($-\beta^j y_t \gamma$) è indipendente da y_{t+j} per $j > 0$.⁹⁰

L’espressione (35) fornisce il valore ottimale di t_t^* solo nell’ipotesi in cui l’unica causa di inefficienza sia l’esternalità climatica. Se invece esistono imposte distorsive sul reddito, il valore ottimale della tassa pigouviana si riduce, anche di quasi un quarto del suo valore.⁹¹ In altri termini, l’espressione a destra del segno di uguaglianza dell’equazione (35) fornisce sempre il valore del costo

⁹⁰Questo risultato dipende dall’ipotesi che $u(c_t)$ sia di tipo logaritmico. Golosov *et al.* (2014) dimostra però che anche usando altre funzioni di utilità la stima della tassa di Pigou resta sostanzialmente la stessa.

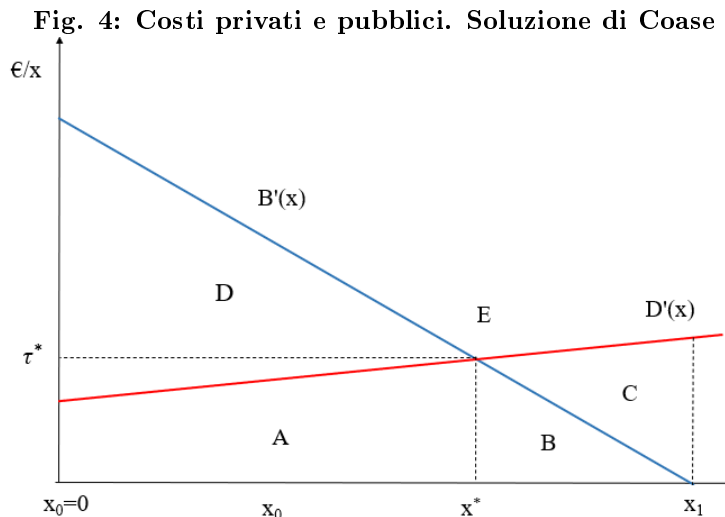
⁹¹Cfr. Barrage (2020).

sociale netto della CO_2 ,⁹² ma rappresenta la tassa pigouviana ottimale solo nel caso in cui venga introdotta in un'economia in cui l'allocazione delle risorse è in partenza ottimale.

6.2 Esternalità e diritti di emissione

Una tassa pigouviana non è l'unico modo per neutralizzare gli effetti di un'esternalità e riallineare costi privati e costi pubblici: un'alternativa è la libera trattativa tra le parti. Tornando all'esempio della fabbrica di prodotti chimici e dell'azienda agricola, consideriamo i due casi estremi: nel primo non esistono vincoli alla possibilità di inquinare il fiume; nel secondo esistono leggi che rendono illegale scaricare sostanze tossiche nella acque, se manca l'accordo con i soggetti danneggiati.

Se la fabbrica di prodotti chimici può decidere liberamente quanto produrre, sceglierà di inquinare fino al livello x_1 , che come si osserva nella Figura 4, è quello che ne massimizza i benefici $B(x)$. In assenza di costi di transazione, questo non è necessariamente un punto di equilibrio, perché l'azienda agricola potrebbe chiedere alla fabbrica di prodotti chimici, dietro corrispettivo, di emettere residui tossici in quantità minore, pari a x^* .



⁹²L'espressione inglese usata per identificare il costo per la società delle emissioni di CO_2 è *Social Cost of Carbon*, ovvero costo sociale del carbonio, a volte abbreviato in quel che segue con l'acronimo CSC.

Il corrispettivo sarebbe pari all'area B e a una quota ξ dell'area C , con $0 < \xi < 1$. Lo scambio sarebbe vantaggioso per entrambe le parti: la fabbrica di prodotti chimici guadagnerebbe una somma pari a ξC , mentre l'azienda agricola otterrebbe $(1 - \xi)C$.

Un accordo sarebbe possibile anche nel caso in cui la decisione fosse a carico di quest'ultima. Inizialmente la scelta sarebbe di non consentire di riversare residui tossici nella acque (punto x_0 in Figura 4). La fabbrica di prodotti chimici avrebbe però la convenienza a proporre di spostare l'equilibrio al punto x^* , previo versamento a titolo di indennizzo di una somma pari all'area $A + \xi D$, con $0 < \xi < 1$. Anche in questo caso entrambe le parti ricaverebbero un beneficio dall'accordo e il punto di equilibrio efficiente E verrebbe raggiunto.

L'esempio precedente ha validità generale ed è noto come 'Teorema di Coase', che afferma che *in assenza di costi di transazione la libera contrattazione tra le parti consente di raggiungere un'allocazione efficiente delle risorse, indipendentemente dalla distribuzione iniziale dei diritti di proprietà*, che è rilevante solo nel determinare la ripartizione dei benefici tra le parti.

La questione se sia preferibile imporre una tassa (e quindi controllare il prezzo) oppure fissare la quantità è stata studiata in particolare da Weitzman,⁹³ che ha mostrato sotto quali condizioni una politica è migliore dell'altra.

Nel caso di un'esternalità simile a quella dell'esempio precedente, Weitzman mostra che in assenza di incertezza le due opzioni si equivalgono, ma se invece la posizione delle due curve dipende da shock esogeni, la scelta tra usare come strumento il prezzo (vale a dire la tassa nel caso di un'esternalità climatica) o la quantità (vale a dire i diritti di emissione) dipende dall'inclinazione della curva dei costi e di quella dei benefici marginali dell'inquinamento. Nessuna delle due politiche è incondizionatamente preferibile ed entrambe sono subottimali.⁹⁴

Sfortunatamente nel caso delle esternalità climatiche il teorema di Coase non sembra applicabile: innanzitutto non è possibile definire diritti di proprietà per l'atmosfera; in secondo luogo le parti coinvolte sono troppo numerose e disperse per il mondo per poter sperare di raggiungere un accordo di lungo termine rispettato da tutti; infine, la quantità ottimale di CO_2 nell'atmosfera non è nota.

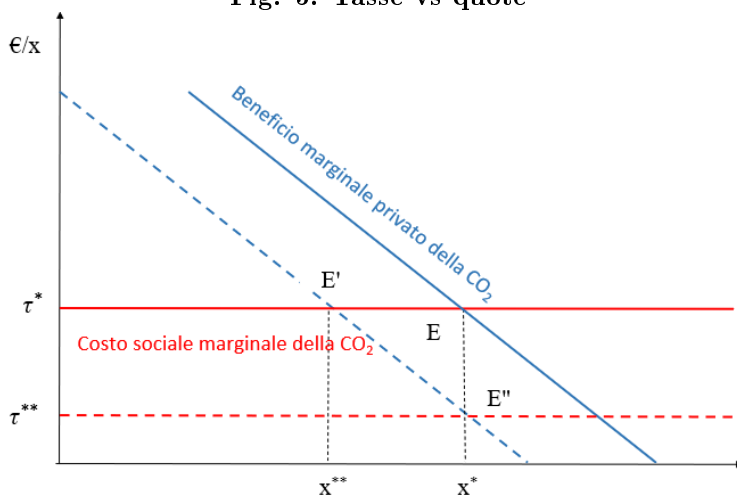
Nonostante ciò, una variante della soluzione prefigurata da Coase, ovvero il sistema di scambio delle quote di emissione, è stata adottata in diversi paesi,

⁹³Cfr. Weitzman (1974).

⁹⁴Secondo Weitzman la scelta tra prezzo e quantità è necessariamente subottimale ("second best"), perché riduce a due le opzioni considerate, trascurando tutte le altre.

tra cui l'Unione europea.

Fig. 5: Tasse vs quote



Il sistema di scambio delle emissioni, che si propone di applicare il principio che "chi inquina paga", obbliga le aziende che operano in determinati settori a richiedere un permesso per ogni tonnellata di CO_2 emessa. Questo è un chiaro incentivo a inquinare meno: meno si inquina, meno si paga. La Commissione europea fissa ogni anno un limite alle emissioni totali di gas serra⁹⁵ che possono essere emessi dagli impianti dei soggetti partecipanti al sistema; le industrie devono comprare queste quote attraverso aste e il prezzo segue le regole della domanda e dell'offerta.⁹⁶

Hassler *et al.* (2016a) argomenta che un sistema basato su quote è meno efficace e più difficile da gestire di uno che invece impone una tassa sulle emissioni. Nel caso delle esternalità climatiche, il costo sociale marginale delle emissioni non è crescente, ma pressoché costante, come mostrato nella Figura 5. La ragione di questa peculiarità è che la concavità nella relazione tra emissioni e aumento della temperatura viene sostanzialmente compensata dalla convessità che caratterizza invece il legame tra quest'ultima e i danni che essa provoca: la linearità della funzione che misura il costo sociale implica quindi che quello marginale sia costante. La principale conseguenza di questa proprietà è che il livello ottimale della tassazione τ^* non dipende dal valore marginale privato

⁹⁵I permessi di emissione decisi annualmente dalla Commissione europea riguardano non soltanto la CO_2 , ma anche altri gas serra (ossido di diazoto e perfluorocarburi).

⁹⁶Per un'analisi approfondita del sistema di scambio dei permessi di emissione dell'Unione europea, si veda Bufano *et al.* (2023).

delle emissioni ed è quindi invariante rispetto a spostamenti di tale curva; la stessa cosa non può invece dirsi per un sistema basato sullo scambio di quote. Fissare il valore appropriato di τ^* richiede quindi meno informazioni di quelle necessarie per mettere in piedi un sistema basato sulle quote: secondo Hassler e i suoi coautori, questa è la prima ragione che rende preferibile usare le tasse per eliminare l'esternalità creata dalle emissioni di gas serra. Il vantaggio diventa particolarmente rilevante se è necessario trovare un accordo a livello internazionale sulle politiche contro il cambiamento climatico: ciascuno Stato infatti ha interesse a non essere veritiero nel riportare il valore marginale assegnato alle emissioni, perché da esso dipende l'allocazione ottimale delle quote tra paesi.

La Figura 5 mostra che il punto di equilibrio E può essere raggiunto indifferentemente fissando una tassa pari a τ^* o un volume di permessi pari a x^* , scambiati a un prezzo identico a τ^* ;⁹⁷ se però la curva che misura il beneficio marginale privato della CO_2 si sposta verso sinistra, il valore della tassa di Pigou non varia, mentre si modifica la quantità ottimale di emissioni, riducendosi fino al punto x^{**} . Nel caso in cui il limite fissato per i permessi non cambia e rimane fermo a x^* , l'equilibrio si sposta nel punto E'' , a cui corrisponde un prezzo più basso. Questo è quanto successo in occasione della crisi finanziaria globale, quando, per effetto della recessione, la domanda di permessi di emissione è drasticamente calata, l'offerta non si è adeguata e il prezzo è collassato. La volatilità del prezzo è per Hassler e i suoi coautori la seconda ragione che penalizza sistemi basati su quote: una volatilità eccessiva non solo danneggia le imprese, ma può creare forti disallineamenti a livello globale tra i prezzi dei permessi di emissione, che sono scambiati in mercati non perfettamente integrati. La terza ragione che spinge a preferire le tasse sulla CO_2 è che la transizione energetica richiede una programmazione di lungo termine, che non è compatibile con la promessa incondizionata di seguire un sentiero predeterminato di emissioni, perché esso dipenderà dall'andamento del PIL e dalla velocità con cui si renderanno disponibili fonti energetiche alternative.

Se però si tiene conto dell'incertezza (che rende aleatorio il calcolo del valore ottimale τ^*), del diverso obiettivo (l'azzeramento delle emissioni, anziché l'equilibrio tra costi e benefici marginali della CO_2) e della percezione dei costi da parte del pubblico delle diverse forme di *carbon pricing*, la superiorità di una *carbon tax* viene messa in discussione.

⁹⁷Perché l'affermazione sia vera è necessario che la tassa di Pigou sia espressa in termini di emissioni e non di PIL, come nella (37), e che l'unità di misura delle emissioni sia la stessa di τ^* .

In un lavoro recente a sei mani con Conny Olovsson,⁹⁸ Hassler e Krusell ribaltano completamente la loro posizione precedente e affermano che la scelta dell'Unione europea di fare affidamento su un meccanismo di scambio di diritti di emissione è quella appropriata, perché consente un controllo accurato delle emissioni e la sua introduzione è più facilmente gestibile dal punto di vista politico, data la maggior semplicità di comunicare un sentiero di riduzione delle emissioni, anziché un profilo variabile nel tempo di una *carbon tax*.

Opinione opposta è invece quella di Tol, che sulla base del Teorema di Weitzman⁹⁹ osserva che commettere errori nella valutazione delle emissioni, le cui variazioni al margine hanno effetti trascurabili sullo stock di CO_2 nell'atmosfera, è meno importante di sbagliare nel fissarne il prezzo, che condiziona i comportamenti di consumatori e imprese: imporre una *carbon tax* sarebbe quindi preferibile a un sistema di scambi di diritti di emissione.

Per arrivare alla neutralità climatica l'Unione europea ha scelto di fare affidamento soprattutto sui diritti di emissione, mentre sotto la Presidenza Biden gli Stati Uniti hanno seguito una strada diversa, mirando ad aumentare l'offerta di energia verde e a ridurne il prezzo. L'Appendice B contiene una descrizione più articolata delle politiche adottate nelle due principali giurisdizioni.

6.3 Tasse, diritti di emissione e transizione energetica

Hassler *et al.* (2016a) prendono spunto dalle politiche per il controllo delle emissioni di CO_2 per fare una serie di considerazioni sulla transizione energetica. I costi di estrazione di gas e petrolio sono in genere molto inferiori al prezzo di mercato, per cui lo sfruttamento dei giacimenti assicura al proprietario una rendita cospicua. Finché tale rendita non verrà azzerata – via tassazione o per la progressiva diminuzione delle quote di emissione – l'utilizzo di gas e petrolio presumibilmente continuerà fino all'esaurimento delle riserve. Dato il bassissimo costo da sostenere per lo sfruttamento di giacimenti come quelli dell'Arabia Saudita, servirebbero tasse elevatissime, ben superiori a quelle considerate da molti studiosi sufficienti a rimuovere l'esternalità climatica, per azzerare l'impiego di gas e petrolio: come è infatti evidente anche dalla Figura 5, il livello ottimale di emissioni non è nullo, perché il valore sociale delle fonti di energia fossile resta positivo, anche una volta tenuto conto dei danni provocati dall'accumulo di gas serra.

⁹⁸Cfr. Hassler, Krusell e Olovsson (2024).

⁹⁹Cfr. Weitzman (1974).

Secondo Hassler e i suoi coautori, lo sfruttamento illimitato delle riserve "convenzionali"¹⁰⁰ di petrolio e gas non è incompatibile con il contenimento dell'aumento delle temperature entro limiti sostenibili. Usando dati di BP plc (ex British Petroleum), stimano infatti che l'esaurimento delle scorte delle due materie prime comporterebbe un aumento del 18% di M_t , la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera, a cui corrisponderebbe un innalzamento di $0,7^\circ C$ della temperatura,¹⁰¹ un valore non piccolo, ma che comunque comporterebbe danni relativamente contenuti.

La situazione è completamente diversa se si considera invece il carbone. L'estrazione di carbone è un'attività a basso valore aggiunto: il prezzo non si discosta mai in modo significativo dai costi di produzione, per cui tutto ciò che lo comprime, anche solo marginalmente, può rendere poco o nulla remunerativo lo sfruttamento dei giacimenti. Il carbone inoltre è disponibile in quantità pressoché illimitate: sulla base dei dati IEA citati da Hassler e Krusell (2018), le riserve conosciute sono decine di volte superiori a quelle di petrolio e gas sommate e sono sufficienti ad assicurare per secoli la prosecuzione ai ritmi attuali del consumo di energia fossile. Per questa ragione anche una *carbon tax* molto inferiore al valore ottimale, che non intaccasse in modo significativo l'impiego di petrolio e gas ma azzerasse quello del carbone, potrebbe essere estremamente efficace nel ridurre le emissioni di gas serra e nel contenere i costi dei cambiamenti climatici.

Una *carbon tax* con queste caratteristiche avrebbe il vantaggio di non essere indigesta, in quanto poco onerosa, e sarebbe più facile da concordare a livello globale: i giacimenti di carbone sono infatti presenti in modo abbastanza uniforme in tutte le aree geografiche e sono prevalentemente destinati all'impiego interno, con flussi ridotti di importazioni ed esportazioni; i costi di un loro mancato sfruttamento sarebbero pertanto distribuiti in modo più uniforme di quanto avverrebbe, per esempio, nel caso di una tassa che rendesse non remunerativa

¹⁰⁰Le risorse petrolifere convenzionali sono costituite da giacimenti per i quali le caratteristiche geologiche delle formazioni che contengono il greggio e le proprietà fisiche del fluido ne consentono un flusso spontaneo verso i pozzi di estrazione. Sono invece non convenzionali quelle in cui il petrolio è intrappolato in depositi rocciosi o in cui il greggio presenta una densità elevata, prossima o superiore a quella dell'acqua. Lo sfruttamento delle riserve non convenzionali richiede l'applicazione di tecnologie specifiche e costose.

¹⁰¹Il calcolo è effettuato sulla base dell'equazione (11): $T(F_t) = \frac{\eta}{\kappa - \chi} \frac{1}{\ln 2} \ln \frac{M_{t+\infty}}{M_t}$. Assegnando il valore 3 alla costante $\frac{\eta}{\kappa - \chi}$, si ha infatti che $3 \frac{\ln 1,18}{\ln 2} = 0,7$, dove 1,18 è il rapporto $\frac{M_\infty}{M_{2015}}$ tra la concentrazione di CO_2 che si avrà una volta esaurite le riserve di petrolio e gas e quella osservata nel 2015.

l'estrazione del petrolio.¹⁰²

Hassler, Krusell e Nycander usano l'espressione "it's (almost) all about coal" per sottolineare l'importanza di azzerare l'uso del carbone.¹⁰³ Le loro argomentazioni sono convincenti, ma si basano sul presupposto che le riserve delle fonti di energia fossile siano stimate con un elevato grado di affidabilità. Questo può essere vero per il carbone, la cui estrazione genera ricavi solo di poco superiori ai costi e quindi non giustifica investimenti per la ricerca di nuovi giacimenti, ma lo è forse meno per gas e petrolio.

7 Le altre equazioni del modello

Gli MVI sono modelli neoclassici di crescita à la Solow, in cui il progresso tecnico è esogeno¹⁰⁴ e le famiglie scelgono quanto consumare in ogni periodo per massimizzare $U_t = \sum_{j=0}^{\infty} \beta^j u(c_{t+j})$, che rappresenta l'utilità totale conseguita nel corso della vita. La presenza del fattore di sconto β consente di dare più peso al consumo corrente rispetto a quello futuro.¹⁰⁵

Per l'agente rappresentativo¹⁰⁶ la funzione di utilità è usualmente di tipo CRRA, cioè ha la proprietà che il coefficiente di avversione relativa al rischio è costante, come in una funzione di questo tipo:

¹⁰²Anche se introdotta solo in alcuni paesi, una tassa finalizzata ad azzerare il consumo del carbone avrebbe effetti positivi sulla concentrazione di CO_2 nell'atmosfera. I mercati del carbone sono segmentati, per cui una riduzione del prezzo nell'area in cui la domanda si contrae per effetto del prelievo fiscale, non si trasmetterebbe ad altri paesi, non stimolerebbe il consumo globale e consentirebbe una riduzione delle emissioni. La stessa cosa non accadrebbe nel caso di un'imposta (non concordata a livello internazionale) che colpisse il petrolio, il cui mercato è globale: la riduzione della domanda in alcuni paesi causata dalla tassazione si tradurrebbe in maggiori consumi nel resto del mondo, con effetti trascurabili o addirittura negativi sul volume di emissioni.

¹⁰³Cfr. Hassler, Krusell e Nycander (2016), pag. 527.

¹⁰⁴Nei modelli DICE e RICE di Nordhaus il progresso tecnico è esogeno, ma esistono anche altri MVI in cui la produttività totale di capitale e lavoro e/o le tecniche di risparmio energetico sono endogene.

¹⁰⁵Negli MVI, come per esempio i modelli di Nordhaus, un agente rappresentativo con una vita infinita sceglie in ogni periodo quanto consumare e quanto risparmiare per massimizzare l'utilità nel periodo corrente e in tutti quelli futuri. Questo processo di ottimizzazione può essere interpretato anche diversamente, come il risultato delle decisioni non di un singolo agente, ma di una sequenza infinita di generazioni successive, ciascuna delle quali si preoccupa della propria discendenza. Il parametro β denota quindi il peso che nel processo di ottimizzazione viene assegnato al benessere delle generazioni future. La scelta del valore appropriato di β è particolarmente importante per valutare le politiche di mitigazione, come ampiamente evidenziato nel Rapporto Stern (cfr. la sezione 12).

¹⁰⁶Ai termini agente rappresentativo, famiglia e consumatore è associato lo stesso significato.

$$u(c_t) = \begin{cases} \frac{c_t^{1-\zeta}}{1-\zeta} & \forall \zeta > 1, \zeta \neq 1 \\ \ln c_t & \text{se } \zeta = 1 \end{cases} \quad (38)$$

dove $\zeta = \frac{c_t u''(c_t)}{u'(c_t)}$ è il coefficiente di avversione relativa al rischio.¹⁰⁷ La massimizzazione di U_t è soggetta al vincolo di bilancio:

$$c_t + b_{t+1} + k_{t+1} - (1 - \delta)k_t = w_t h_t + r_t k_t + (1 + r_t)b_t + \Pi_t \quad (39)$$

dove b_t rappresenta debito – pubblico o privato – remunerato al tasso reale r_t , che, in assenza di incertezza, coincide con la produttività marginale del capitale; δ è il tasso di deprezzamento del capitale e Π_t è la rendita che spetta ai proprietari delle materie prime energetiche, che, come detto nella sezione 4.2, è trascurabile per il carbone e rilevante per il petrolio. Nell'ipotesi che solo il fattore lavoro sia usato nella produzione del petrolio, Π_t è dato dall'equazione seguente:

$$\Pi_t = (p_t^p - \tau_t^*)E_t^p - w_t h_t^p \quad (40)$$

L'ipotesi sottostante il vincolo di bilancio (39) è che l'agente rappresentativo possieda sia le imprese che producono il bene finale sia i giacimenti di materie prime.

L'andamento del consumo nel tempo è determinato dalla condizione di equilibrio che garantisce la massimizzazione dell'utilità dell'agente rappresentativo: l'utilità marginale a cui si rinuncia con il risparmio in t deve essere pari a quella che si ottiene nel periodo successivo consumando il risparmio, inclusivo degli interessi maturati al tasso r_t . Questa condizione è espressa dall'equazione $u'(c_t) = \beta u'(c_{t+1})(1 + r_t)$.

La domanda di capitale e lavoro è ottenuta uguagliando le rispettive produttività marginali al costo d'uso dei due fattori. Nel caso di una funzione di produzione di tipo Cobb-Douglas come quella presentata nella sezione 4.1 si ha:

$$\frac{\partial y_t}{\partial k_t} = \alpha_1 \frac{y_t}{k_t} = r_t + \delta \qquad \frac{\partial y_t}{\partial h_t} = \alpha_2 \frac{y_t}{h_t} = w_t \quad (41)$$

¹⁰⁷ $u(c_t)$ è una funzione concava, per cui l'utilità addizionale di un'unità di consumo in più è inferiore a quella che si perde se c_t si riduce dello stesso ammontare, ovvero $|u(c_t - \delta) - u(c_t)| > u(c_t + \delta) - u(c_t)$. Questo comporta che, pur di stabilizzarlo, il consumatore è disposto a rinunciare a una frazione del proprio consumo, frazione che è proporzionale al parametro ζ . Il grado di avversione al rischio dipende dalla curvatura di $u(c_t)$.

dove r_t e w_t sono considerate variabili esogene. Nei modelli DICE e RICE Nordhaus adotta l'ipotesi che il tasso di interesse si riduca progressivamente, passando dal 3% annuo a inizio secolo a meno del 2% nel 2200. Poiché gli MVI sono interessati agli scenari di lungo termine, il tasso di disoccupazione non è una variabile inclusa: i lavoratori disponibili sono sempre occupati e, per semplificare ulteriormente, si assume che ci sia piena coincidenza tra occupazione e popolazione. Quest'ultima è una variabile esogena e tende ad aumentare a tassi decrescenti, fino a stabilizzarsi al livello di 11,5 miliardi di abitanti.¹⁰⁸

L'irrelevanza dello studio delle fluttuazioni cicliche giustifica l'assenza di strumenti di controllo della domanda aggregata. La politica monetaria è molto spesso completamente assente negli MVI, così come l'inflazione; non esiste il tasso di interesse nominale, ma solo quello reale, che serve per eguagliare domanda e offerta di risparmio. Tutti i prezzi – salario, costo d'uso del capitale e prezzo delle materie prime energetiche – sono espressi in funzione di quello del prodotto finale y_t , usato come numerario.

Anche la politica fiscale, con poche eccezioni, riveste un ruolo secondario. L'imposizione di una tassa su chi irradia CO_2 nell'atmosfera e la vendita di permessi di emissione genera introiti per lo Stato, che possono essere utilizzati per finanziare trasferimenti alle famiglie o acquisti di beni e servizi.

Nella forma più semplificata, l'equazione di bilancio del settore pubblico è quindi di questo tipo:

$$t_t^* + b_{t+1} = Tr_t + (1 + r_t)b_t \quad (42)$$

dove t_t^* è il gettito della tassa sulle emissioni, l'unica entrata ipotizzata, Tr_t i trasferimenti alle famiglie e b_t il debito contratto per finanziare le spese in disavanzo.¹⁰⁹

Lavoro e capitale possono spostarsi liberamente tra il settore che produce il bene finale a quello che estrae e rende disponibili le materie prime energetiche, per cui la remunerazione dei fattori di produzione è la stessa in entrambi i settori. La condizione di equilibrio del mercato del lavoro e del capitale richiede quindi che la somma dei rispettivi fattori usati nell'economia sia uguale alla loro dotazione.

¹⁰⁸Le ipotesi sulla dinamica demografica e sul tasso di interesse, queste ultime legate a quelle sul progresso tecnico, sono prese da Nordhaus e Boyer (2000), pp. 16-17.

¹⁰⁹Per valutare come la presenza di imposte distorsive modifica la tassa ottimale sulle emissioni, Barrage (2020) include nel bilancio del settore pubblico tra le entrate le imposte sul lavoro e sul capitale e tra le uscite acquisti di beni e servizi.

8 Un prototipo: il modello DICE

Il prototipo di un MVI è il modello DICE di Nordhaus,¹¹⁰ costruito negli anni '90 e poi continuamente perfezionato, per studiare e valutare le politiche economiche necessarie a mitigare l'impatto sull'ambiente e sul clima dell'attività economica. Secondo Nordhaus, grazie alla sua dimensione ridotta e al fatto di trattare il mondo come se fosse un'unica unità politico-territoriale, il modello DICE presenta numerosi vantaggi, tra cui quelli di rendere (i) trasparenti le connessioni tra variabili economiche e climatiche, (ii) poco onerosi gli aggiornamenti e (iii) possibili le simulazioni su orizzonti lunghi; questo al costo però di trascurare che le diverse nazioni e aree del mondo presentano condizioni economiche e climatiche eterogenee, che rendono estremamente difficile concordare politiche condivise per il conseguimento di un obiettivo comune.

Il modello si basa sul presupposto che la concentrazione di gas serra nell'atmosfera sia assimilabile a capitale negativo, per cui la riduzione delle emissioni costituisce una forma di investimento, che limita i danni causati dai cambiamenti climatici e crea le condizioni per un aumento dei consumi in futuro: gli investimenti "per il clima" servono a sostituire le fonti di energia fossile con altre che limitano o azzerano la diffusione di CO_2 e non arrecano danni all'ambiente.

La riduzione delle emissioni comporta costi immediati, ma sfortunatamente procura benefici che si manifestano solo con lunghissimi ritardi. Secondo Nordhaus *"poche decisioni politiche o personali, ad eccezione della scommessa di Pascal, coprono orizzonti temporali così lunghi, spingendo a ritardare il momento in cui decisioni costose dovranno essere prese"*.¹¹¹

L'idea centrale del modello DICE è che l'obiettivo primario delle politiche economiche e ambientali sia quello di migliorare le condizioni di vita della generazione corrente e di quelle future. Il benessere è misurato dai consumi, che includono non soltanto beni e servizi, ma anche i vantaggi che derivano dalla disponibilità di tempo libero, dalla fruizione dei prodotti dell'arte e della cultura e dal godimento delle bellezze naturali. La politica economica dovrebbe quindi massimizzare il flusso dei consumi nel tempo, privilegiando, a parità di altre condizioni, quello di oggi rispetto a quello di domani.

¹¹⁰Cfr. Nordhaus (2008), pagg. 205-209. Si fa riferimento alla versione del 2007 del modello DICE, che non differisce sostanzialmente dalle successive, l'ultima delle quali è del 2023.

¹¹¹Cfr. Nordhaus e Boyer (2000), p. 9.

8.1 Le equazioni del modello DICE

$$W_t = \sum_{j=0}^{Tmax} h_{t+j} u(\tilde{c}_{t+j}) (1 + \rho)^{-j} \quad (D.1)$$

$$u(\tilde{c}_t) = \left(\frac{\tilde{c}_t^{1-a}}{1-a} \right) \quad (D.2)$$

$$y_t = \Omega(T_t) (1 - \Lambda_t) A_t k_t^\alpha h_t^{1-\alpha} \quad (D.3)$$

$$\Omega(T_t) = \frac{1}{1 + (\theta_1 T_t + \theta_2 T_t^2)} \quad (D.4)$$

$$\Lambda_t = \varsigma_t \vartheta_{1,t} \mu_t^{\vartheta_2} \quad (D.5)$$

$$y_t = c_t + i_t \quad (D.6)$$

$$\tilde{c}_t = \frac{c_t}{h_t} \quad (D.7)$$

$$k_t = (1 - \delta) k_{t-1} + i_t \quad (D.8)$$

$$E_t^{Ind} = \sigma_t (1 - \mu_t) A_t k_t^\alpha h_t^{1-\alpha} \quad (D.9)$$

$$CCum \leq \sum_{t=0}^{Tmax} E_t^{Ind} \quad (D.10)$$

$$E_t = E_t^{Ind} + E_t^{Land} \quad (D.11)$$

$$M_t = M_{t-1} - \phi_{12} M_{t-1} + \phi_{21} M_{t-1}^U + E_t \quad (D.12)$$

$$M_t^U = M_{t-1}^U + \phi_{12} M_{t-1} - (\phi_{21} + \phi_{23}) M_{t-1}^U + \phi_{32} M_{t-1}^L \quad (D.13)$$

$$M_t^L = M_{t-1}^L + \phi_{23} M_{t-1}^U - \phi_{32} M_{t-1}^L \quad (D.14)$$

$$F_t = \frac{\eta}{\ln 2} \ln \frac{M_t}{M_0} + F_t^{Ex} \quad (D.15)$$

$$T_t = T_{t-1} + \zeta_1 \left((F_t - \kappa T_{t-1}) - \zeta_2 (T_{t-1} - T_{t-1}^O) \right) \quad (D.16)$$

$$T_t^O = T_{t-1}^O + \zeta_3 (T_{t-1} - T_{t-1}^O) \quad (D.17)$$

$$\varsigma_t = \varphi_t^{1-\vartheta_2} \quad (D.18)$$

Le equazioni (D.1) e (D.2) rappresentano, rispettivamente, la funzione di benessere sociale intertemporale e l'utilità individuale al tempo t , che dipendono dal consumo pro-capite \tilde{c}_t ; h_t rappresenta la popolazione, che per ipotesi coincide con il numero di occupati, e consente di trasformare per aggregazione l'utilità dell'agente rappresentativo in benessere sociale. La disutilità del lavoro non è un argomento della funzione di utilità: poiché l'unità di tempo nel modello DICE è il decennio, in prima approssimazione si può assumere che ciascun periodo

copra un ciclo economico, in cui eccessi di domanda e di offerta sui mercati si compensano; l'offerta di lavoro del consumatore può quindi essere considerata costante, rendendo non necessaria la scelta di quante ore lavorare e di quanto tempo libero disporre. ρ è il tasso di interesse usato per scontare il consumo futuro; a rappresenta il reciproco dell'elasticità di sostituzione intertemporale e determina come il consumo risponde a variazione nel tasso di interesse. È quindi indirettamente una misura dell'importanza per la funzione di benessere sociale dell'utilità delle generazioni future: se $a \approx 0$ i consumi in tempi diversi sono valutati in modo simile, mentre il contrario accade quando $a \gg 0$.

Come indicato dalla (D.3), la funzione di produzione è di tipo Cobb-Douglas: A_t rappresenta il progresso tecnico e α è l'elasticità del prodotto rispetto al capitale. $\Omega(T_t) < 1$ è la quota di output che rimane una volta sottratta la parte necessaria a coprire i danni causati dall'aumento delle temperature, mentre Λ_t rappresenta i costi per il contenimento delle emissioni.¹¹²

L'equazione successiva fornisce l'espressione di $\Omega(T_t)$. La funzione di danno per unità di prodotto è la parte del denominatore che dipende dalla temperatura: $D_t = \theta_1 T_t + \theta_2 T_t^2$, per cui $\Omega(T_t) = \frac{1}{1+D_t}$. Stimare la funzione di danno è estremamente complicato: Nordhaus assume che cresca più che proporzionalmente rispetto all'aumentare della temperatura e ne stima i parametri cercando di replicare i costi che il riscaldamento globale arreca all'agricoltura, quelli causati dall'aumento del livello delle acque, i danni alla salute e quelli potenziali di eventi climatici catastrofici.

La relazione (D.5) rappresenta il costo per unità di prodotto della riduzione delle emissioni: è una funzione molto convessa ($\vartheta_2 \gg 1$) del tasso di riduzione delle emissioni μ_t ed è inversamente proporzionale al grado di partecipazione di tutti i paesi agli sforzi per ridurre le esternalità climatiche (ς_t).¹¹³ Il modello DICE implicitamente include una *backstop technology*, ovvero una tecnologia "verde" a emissioni zero, alternativa alle fonti di energia fossile: nei primi anni del suo utilizzo questa tecnologia è costosa ($\vartheta_{1,t}$ elevato), ma diventa progressivamente più conveniente, fino a soppiantare tutte le altre opzioni, quando $\vartheta_{1,t}$ si attesta su livelli bassi¹¹⁴ e μ_t diventa uguale a 1.

¹¹²La riforestazione e il risparmio di energia, che si ottiene per esempio riducendo la quantità di combustibili fossili utilizzati per produrre un'unità di output oppure costruendo abitazioni più efficienti, sono un esempio di come si possono contenere le emissioni.

¹¹³ ς_t , che Nordhaus definisce *participation cost mark-up*, è pari al rapporto tra costi di mitigazione in presenza di scarsa cooperazione tra paesi e costi di mitigazione in caso di politiche pienamente condivise.

¹¹⁴Il valore di $\vartheta_{1,t}$ a cui si fa riferimento è quello del costo annuale della tecnologia verde.

Le tre equazioni successive sono identità che definiscono, rispettivamente, l'equilibrio tra domanda (data dalla somma di consumi e investimenti) e offerta (ovvero il PIL), il consumo pro-capite e l'accumulazione del capitale.

La relazione (D.9) è una forma ridotta, che lega indirettamente le emissioni di biossido di carbonio all'attività produttiva. A differenza della maggior parte degli MVI, nel modello DICE l'energia non è un argomento della funzione di produzione: le emissioni industriali non sono quindi il risultato della combustione di fonti di energia fossile, ma sono invece un sottoprodotto dell'attività produttiva. σ_t rappresenta l'intensità carbonica dell'output, ovvero la quantità di CO_2 immessa nell'atmosfera per ottenere una unità di prodotto. Il volume di emissioni può essere diminuito utilizzando energia verde, impiegando tecniche per la cattura e lo stoccaggio dell'anidride carbonica oppure adottando forme di efficientamento energetico: $\sigma_t(1-\mu_t)A_tk_t^\alpha h_t^{1-\alpha}$ è il volume di emissioni prodotte una volta adottate tutte le forme di mitigazione possibile. La (D.10) esprime la condizione che la quantità di energia fossile utilizzabile non possa superare le riserve disponibili: il vincolo è espresso non in termini di riserve di petrolio o carbone, ma di emissioni di biossido di carbonio, che non possono superare il massimale $CCum$.¹¹⁵ La presenza di questo vincolo fa sì che nel lunghissimo termine si passi da fonti fossili a energia verde.¹¹⁶ L'identità (D.11) definisce le emissioni totali come somma di quelle industriali e di quelle relative alle modifiche d'uso del suolo, che nel modello sono una variabile esogena.¹¹⁷

Le equazioni dalla (D.12) alla (D.14) descrivono il ciclo del carbonio, presentato in dettaglio nella sezione 3.1. Vengono considerati tre bacini che assorbono e scambiano CO_2 : l'atmosfera, la biosfera e le profondità oceaniche; i parametri ϕ_{ij} sono stimati in modo tale da replicare le proprietà di modelli molto più complessi e raffinati del ciclo del carbonio. La (D.15) è la formula di Arrhenius, che determina il forzante radiativo in funzione della concentrazione nell'atmosfera di biossido di carbonio e di altri gas serra; l'effetto di questi ultimi è rappresentato dal termine F_t^{Ex} , quantitativamente meno rilevante e trattato come esogeno.

Le equazioni (D.16) e (D.17) rappresentano il modello del clima, descritto in dettaglio nella sezione 3.2, che quantifica l'effetto del forzante radiativo sulla

¹¹⁵Il limite considerato da Nordhaus è di 6 milioni di miliardi di tonnellate di CO_2 . Cfr. Nordhaus (2008), p. 57.

¹¹⁶Anche se il modello DICE non include il petrolio o altre materie prime energetiche, Nordhaus descrive la transizione verso fonti di energia verde in termini di rendita di Hotelling: quanto più scarse diventano le riserve di combustibili fossili, tanto più i loro prezzi aumentano, rendendo inevitabile il passaggio a fonti di energia alternative. Cfr. Nordhaus (2008), p. 57.

¹¹⁷ E_t^{Land} include non solo le emissioni indotte dai cambiamenti d'uso del suolo, ma anche i gas serra diversi dal biossido di carbonio.

temperatura della superficie terrestre e degli oceani. La (D.18), infine, misura l'extra-costo dovuto all'assenza di piena condivisione delle politiche volte a eliminare le esternalità climatiche, da cui dipende il costo per unità di prodotto della riduzione delle emissioni Λ_t (cfr. la (D.5)).¹¹⁸

8.2 Le variabili esogene

Il modello DICE contiene una decina circa di variabili esogene, di cui è necessario ipotizzare l'andamento nel tempo per poter effettuare simulazioni che consentano di valutare l'impatto delle politiche climatiche.

Per quel che riguarda il progresso tecnico Nordhaus ipotizza un progressivo rallentamento: in una delle calibrazioni più recenti il tasso di crescita di A_t converge allo 0,9% a partire dal 2100; la dinamica demografica, che determina h_t , segue un andamento simile, azzerandosi in corrispondenza di una popolazione mondiale di 10,5 miliardi.¹¹⁹

μ_t , il tasso di riduzione delle emissioni, è spesso usata come variabile di controllo, data l'assenza nel modello DICE del bilancio del settore pubblico e quindi di un ruolo esplicito per la *carbon tax*, e assume quindi i valori richiesti dall'esercizio che si vuole svolgere.

Nell'anno base l'intensità carbonica σ_t è stimata aggregando le emissioni delle principali aree geografiche che contribuiscono alla produzione dell'output y_t ; successivamente si assume che vengano adottate tecniche di produzione che riducono l'uso di energia per unità di prodotto: σ_t si ridurrebbe quindi progressivamente, anche se a tassi decrescenti, e a partire dal 2100 si contrarrebbe dello 0,87% all'anno.

La quota di partecipazione φ_t è anch'essa determinata non in base all'evidenza empirica, ma in funzione degli scenari che si vogliono simulare. Il modello DICE tratta l'economia mondiale come se fosse un'entità politica e amministrativa unica e non è quindi in grado di valutare i diversi equilibri che si possono determinare se la condivisione delle politiche climatiche è piena, parziale o nulla: valori opportunamente calibrati della variabile φ_t consentono però di mimare le caratteristiche di equilibri caratterizzati da comportamenti cooperativi o opportunistici.

¹¹⁸ φ_t è un indice che misura il grado di condivisione a livello mondiale delle politiche climatiche.

¹¹⁹Cfr. Nordhaus e Satorc (2013), pp. 9-10. Poiché si tratta dell'economia mondiale, l'azzeramento della dinamica demografica e un tasso di crescita inferiore all'1% della produttività totale dei fattori (A_t) equivale a ipotizzare un forte rallentamento dell'attività economica, che anche nell'ultimo decennio è stata mediamente superiore al 3% annuo.

L'andamento di E_t^{Land} e F_t^{Ex} infine è derivato dalle stime presenti in letteratura.

8.3 Politiche di mitigazione e adattamento

Il modello DICE consente di valutare l'impatto di politiche di riduzione delle emissioni (*mitigation policies*) sul benessere, la concentrazione di anidride carbonica e le temperature. Politiche alternative si traducono in andamenti diversi di μ_t e di $\vartheta_{1,t}$, che se da un lato hanno un costo, misurato per un'unità di prodotto da Λ_t , dall'altro producono benefici, riducendo le emissioni E_t^{Ind} , la temperatura T_t e quindi il danno $\Omega(T_t)$ provocato dal riscaldamento globale. Per le politiche di adattamento (*adaptation policies*), il cui obiettivo è di mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici sulle condizioni di vita, la questione invece è differente: in DICE non esistono variabili che ne rappresentano i costi e neppure variabili che ne misurano i risultati; l'ipotesi implicita è che in ogni periodo vengano adottate le politiche più efficaci, i cui effetti sono incorporati nella funzione di danno.

Il modello DICE non è un'eccezione, in quanto lo stesso approccio è adottato nella stragrande maggioranza degli MVI. Esistono motivi più che validi che giustificano questa soluzione. Le politiche di adattamento sono in larga misura il risultato di decisioni private, come per esempio quelle di migrare, di scegliere colture più resistenti alle alte temperature, di evitare di costruire abitazioni in zone soggette a inondazioni o uragani e di dotarsi di condizionatori d'aria efficienti.¹²⁰ Il ruolo pubblico è invece ridotto, nonostante possa esplicarsi sia attraverso la regolamentazione sia attraverso gli interventi diretti. Il governo può per esempio garantire adeguati servizi sanitari durante i periodi più caldi dell'anno,¹²¹ costruire argini e dighe per limitare i danni provocati

¹²⁰Le migrazioni rappresenteranno, in prospettiva, una delle forme più efficaci di adattamento al cambiamento climatico. Gli impatti del riscaldamento globale varieranno infatti in modo significativo tra le diverse regioni del mondo, a causa sia dell'ampia eterogeneità delle condizioni climatiche, sia delle frizioni che limitano la mobilità di popolazioni, attività economiche e infrastrutture. In assenza di tali vincoli, la possibilità di spostarsi liberamente mitigherebbe in misura rilevante i costi economici associati all'aumento delle temperature. Negli ultimi anni sono stati sviluppati modelli di valutazione integrata che incorporano esplicitamente la dimensione spaziale, offrendo stime più realistiche e dettagliate degli impatti economici del cambiamento climatico a livello locale e globale. Cfr. Desmet e Rossi-Hansberg (2024).

¹²¹Tol (2019) cita quanto successo in Francia nel 2003: nei giorni più caldi dell'estate si è verificato che la maggior parte dei medici fosse in ferie, senza la possibilità di richiamarli in servizio; anche a causa dell'assenza di adeguati presidi sanitari, 40.000 persone sono morte per gli effetti delle alte temperature. Tol, con riferimento agli Stati Uniti, cita un altro esempio di adattamento attuabile attraverso la regolamentazione, ovvero proibire che durante ondate di calore gli addetti alla sicurezza impediscano l'accesso a coloro che cercano riparo dall'afa

dall'innalzamento delle acque e favorire la ricerca nella geoingegneria.

Il maggior peso relativo delle scelte private rispetto a quello delle politiche pubbliche non è però una ragione sufficiente per non tener conto delle politiche di adattamento, che costituiscono un'alternativa a quelle di mitigazione. Poiché i cambiamenti climatici possono essere contenuti, ma non evitati, un *policy mix* appropriato include sia le une che le altre.

Un ulteriore vantaggio delle politiche di adattamento è che, a differenza di quelle di mitigazione, possono essere efficaci anche in assenza di cooperazione internazionale.

de Bruin, Dellink e Tol¹²² propongono un modo semplice di introdurre l'adattamento nei modelli di valutazione integrata. Il punto di partenza del loro approccio è la scomposizione dei danni causati dall'aumento delle temperature (GD_t) in una componente che può essere eliminata tramite politiche di adattamento ($P_t \times GD_t$) e nella parte restante (RD_t). P_t è la frazione di danni che si vuole rimuovere ($0 \leq P_t \leq 1$) e viene scelta per massimizzare la funzione di benessere collettivo;¹²³ l'adattamento ha un costo (PC_t),¹²⁴ che sottrae risorse al consumo ed è una funzione convessa del parametro P_t .

L'introduzione di politiche di adattamento comporta quindi l'aggiunta delle seguenti quattro equazioni al modello DICE:

$$GD_t = \nu_1 T_t + \nu_2 T_t^{\nu_3} \quad (\text{D.19})$$

$$RD_t = GD_t \times (1 - P_t) \quad (\text{D.20})$$

$$PC_t = \nu_4 P_t^{\nu_5} \quad (\text{D.21})$$

$$D_t = RD_t + PC_t \quad (\text{D.22})$$

Ciascuna variabile misura il danno o costo per unità di prodotto. Per quel che riguarda i parametri che compaiono nelle equazioni, per ν_1 non si hanno restrizioni di segno, mentre i coefficienti ν_j , per $j \neq 1$, sono positivi; ν_3 e ν_5 in particolare devono essere maggiori di 1, in quanto le funzioni di danno (GD_t) e di costo (PC_t) sono convesse.

ai centri commerciali, dove è sempre attivo il condizionamento dell'aria.

¹²²Cfr. de Bruin *et al.* (2009).

¹²³Il fatto che la variabile P_t non venga inclusa nella funzione di utilità lascia supporre che l'adattamento in questione sia il risultato dell'azione pubblica, piuttosto che di scelte private. La cosa peraltro è a fini pratici irrilevante, visto che nel modello DICE non esiste una esplicita distinzione tra pubblico e privato.

¹²⁴Nell'articolo per indicare l'onere delle politiche di adattamento si usa l'espressione costo di protezione, da cui l'abbreviazione PC_t .

L'aggiunta delle nuove variabili comporta anche la modifica dell'equazione (D.4), che definisce $\Omega(T_t)$, ovvero la quota di output che rimane una volta sottratta la parte necessaria a coprire i danni causati dall'aumento delle temperature. La nuova equazione è la seguente:

$$\Omega(T_t) = \frac{1}{1 + RD_t + PC_t} = \frac{1}{(\nu_1 T_t + \nu_2 T_t^{\nu_3})(1 - P_t) + \nu_4 P_t^{\nu_5}} \quad (\text{D.4b})$$

Come evidenziato dalle equazioni (D.20) e (D.21), sia i costi che i benefici degli sforzi di adattamento sono "istantanei",¹²⁵ vale a dire si manifestano solo nel periodo in cui P_t viene modificato, che per il modello DICE significa nell'arco di un decennio. Il valore di P_t viene deciso in ogni periodo; se è determinato in modo ottimale, la minor perdita di output inerente l'adozione di misure di adattamento risulta superiore ai costi di attuazione e quindi non sottrae risorse alle politiche di riduzione delle emissioni.

I parametri delle equazioni di GD_t e PC_t sono calibrati in modo tale da replicare le simulazioni del modello DICE sia in presenza di politiche climatiche ottimali sia nel caso di inazione, in cui la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera raddoppia rispetto all'anno base, fissato al 1900. I valori ottenuti per i coefficienti sono riportati nella tavola 1.

Tavola 1: Coefficienti delle equazioni di de Bruin *et al.* aggiunte al modello DICE

Coefficienti	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4	ν_5
Valore	0,0012	0,0023	2,32	0,115	3,60

La funzione che misura i costi di adattamento risulta fortemente convessa: per valori bassi di P_t è pressoché orizzontale; comincia ad aumentare a tassi crescenti quando $P_t > 0,15$; corrisponde a oneri proibitivi in prossimità di valori superiori a 0,45. Per gli autori l'implicazione di questa calibrazione è che non è mai ottimale ricercare un adattamento completo ai cambiamenti climatici, perché il benessere è massimizzato con un'appropriata combinazione di politiche di riduzione delle emissioni e politiche di adattamento.

¹²⁵Molte politiche di adattamento hanno queste caratteristiche, ma non tutte: un esempio è la costruzione di argini per contenere l'innalzamento delle acque, che produce benefici ritardati e duraturi.

9 Il caso di più aree geografiche: il modello RICE

Modelli come il DICE di Nordhaus hanno il vantaggio di essere più trasparenti e facili da utilizzare, ma presentano limiti rilevanti. Innanzitutto trascurano il fatto che i danni provocati dai cambiamenti climatici non sono gli stessi ovunque: il riscaldamento è maggiore in prossimità dei poli e minore all'equatore e colpisce più le terre emerse dei mari; paesi come il Canada e la Norvegia possono beneficiare dell'aumento delle temperature, mentre le Isole Salomone rischiano di subire danni irreversibili e di scomparire sommerse dalle acque. Inoltre, questi modelli non consentono di valutare in modo soddisfacente gli effetti di politiche climatiche difformi e non coordinate: tassare le emissioni solo in alcune regioni porta a trasferire le produzioni inquinanti dove il consumo di CO_2 non è penalizzato, riducendo – se non annullando – l'effetto desiderato della tassazione.¹²⁶ Infine modelli a un solo paese limitano le politiche di adattamento che possono essere prese in considerazione, escludendo per esempio i flussi migratori: i danni causati dal riscaldamento globale dipendono anche dalla possibilità di spostarsi da regioni diventate insospitabili ad altre con condizioni di vita stabili o rese migliori dall'aumento delle temperature.

Il primo problema da affrontare per specificare un modello a più regioni¹²⁷ è quello di come aggregare le preferenze di ciascuna area geografica per ottenere la funzione di benessere sociale. Poiché l'utilità marginale è decrescente, l'impatto dei danni causati dall'aumento delle temperature è maggiore dove il livello di reddito pro-capite è più basso: se quindi la funzione di benessere sociale è definita dalla somma delle preferenze degli abitanti di ciascuna regione, il suo massimo si ha quando i benefici delle politiche climatiche vengono concentrati nei paesi più poveri, mentre i costi vengono addossati a quelli più ricchi. Il risultato finale è una redistribuzione radicale, che fa convergere il reddito pro-capite di tutti i paesi allo stesso livello. Quello che si ottiene dalla massimizzazione non vincolata della funzione di benessere sociale non è quindi la miglior strategia per ridurre le emissioni di biossido di carbonio, ma piuttosto una politica redistributiva a livello globale. Oltre alla commistione di obiettivi eterogenei, un approccio di questo tipo avrebbe anche lo svantaggio di prescrivere strategie irrealistiche, incapaci di raccogliere il consenso di un gran numero di paesi.

¹²⁶Questo fenomeno è noto come *carbon leakage* e può essere "diretto", se si manifesta sotto forma di delocalizzazione di produzioni ad alte emissioni, oppure "indiretto", se comporta il trasferimento di capitale e lavoro.

¹²⁷L'espressione inglese normalmente usata in letteratura è *multi-region model*: in questa sezione si useranno indistintamente i termini "regione", "area geografica" e "paese".

Un modo per evitare il problema è quello di individuare un sistema di pesi che renda irrilevante la distribuzione iniziale del reddito pro-capite, rendendo ovunque uguale l'impatto di una variazione marginale del consumo. Questo risultato si ottiene scegliendo per ciascuna regione una ponderazione che in ogni periodo è funzione dell'inverso dell'utilità marginale, nota come ponderazione di Negishi.¹²⁸

La funzione di benessere specificata nel modello RICE è la seguente:

$$W_t = \sum_{j=0}^{Tmax} \sum_{I=1}^N \psi_{I,t} h_{t+j}^I u(\bar{c}_{t+j}^I) (1 + \rho^I)^{-j} \quad (46)$$

dove $\psi_{I,t}$ sono i pesi di Negishi, che variano da regione a regione e cambiano nel tempo; ρ^I è il tasso di sconto intertemporale, che nel modello RICE è lo stesso ovunque, sebbene in linea di principio dovrebbe riflettere le preferenze di ciascuna regione. Per le altre variabili la notazione è quella usata in precedenza.

Anche la funzione di produzione deve essere specificata a livello di singola area geografica, per tener conto delle differenze in termini di produttività totale dei fattori e intensità energetica. Ipotizzando una funzione di produzione di tipo Cobb-Douglas, una formulazione standard è la seguente:

$$y_{I,t} = \Omega(T_{I,t}) \left(A_{I,t} k_{I,t}^{\alpha_1} h_{I,t}^{\alpha_2} ES_{I,t}^{1-\alpha_1-\alpha_2} - c_{I,t}^E ES_{I,t} \right) \quad (47a)$$

$$ES_{I,t} = A_{I,t}^e E_{I,t} \quad (47b)$$

$$c_{I,t}^E = q_t + markup_{I,t}^E \quad (47c)$$

$$q_t = \chi_1 + \chi_2 \left(\frac{\sum_{j=t_0}^t \sum_{I=1}^N E_{I,j}}{CumC} \right)^{\chi_3} \quad (47d)$$

dove $ES_{I,t}$ rappresenta il contributo all'output dei servizi forniti dall'input energetico, $c_{I,t}^E$ è il costo unitario dell'energia e $A_{I,t}^e$ denota il progresso tecnico applicato al risparmio energetico. Il termine $\Omega(T_{I,t})$, che compare nell'equazione (47a) e che misura la quota di output che rimane una volta sottratta la parte

¹²⁸Nonostante la scelta dei pesi di Negishi sia usata comunemente nei modelli di valutazione integrata, è stata oggetto di aspre critiche. Stanton (2011) sottolinea che adottare una ponderazione di questo tipo equivale a considerare più importante il benessere delle regioni ricche rispetto a quello delle aree più povere e porta a escludere del tutto politiche redistributive. Questa scelta non dovrebbe essere giustificata come una soluzione di natura tecnica, ma dovrebbe essere presentata per quello che è, ovvero un giudizio di valore. Stanton suggerisce anche quale alternativa potrebbe essere adottata: calcolare le politiche ottimali che corrispondono sia a funzioni di benessere basate sui pesi di Negishi sia a quelle ottenute per semplice aggregazione, lasciando la scelta finale ai *policymaker*.

necessaria a coprire i danni causati dai cambiamenti climatici, è funzione non più della temperatura media della terra, ma di quella della regione I .

Il termine $c_{I,t}^E ES_{I,t}$ misura il costo dei servizi energetici necessari alla produzione, che rappresentano beni intermedi e devono quindi essere sottratti dall'output per ottenere il valore aggiunto. L'equazione (47b) esprime $ES_{I,t}$ come una funzione delle emissioni di CO_2 ($E_{I,t}$), usate come "proxy" dell'input di materie prime energetiche e del progresso tecnico mirato a ridurre l'uso di energia, mentre la (47c) definisce il costo unitario dell'energia come somma di due componenti: q_t , il costo di estrazione di E_t , che è identico ovunque, e $markup_{I,t}^E$, il margine di profitto, che dipende dalla tassazione e dai costi di trasporto e distribuzione, differenti da regione a ragione. La forma funzionale di q_t è descritta nell'equazione successiva, che è praticamente identica alla (23): *CumC* rappresenta il volume di emissioni – usato come indicatore della quantità di combustibile fossile già estratta e quindi del grado di esaurimento delle riserve – superato il quale il costo di estrazione comincia a crescere a un ritmo elevato ($\chi_3 > 1$).

Una caratteristica degli MVI a più regioni è quella di non considerare gli scambi commerciali tra le aree geografiche; spesso neppure i flussi migratori sono contemplati. La ragione principale è che introdurre equazioni per le esportazioni e le importazioni rappresenta una complicazione inutile, che comporta un aumento della dimensione del modello, ma che non serve a rendere più accurata la valutazione delle politiche necessarie a eliminare le esternalità indotte dai cambiamenti climatici. L'unica interazione tra paesi di cui si tiene conto è quella legata alla distribuzione dei costi delle politiche di mitigazione.

Nell'ipotesi che il controllo delle emissioni sia effettuato assegnando a ciascun paese un numero concordato di permessi di emissione ($\Xi_{I,t}$), decrescente nel tempo e il cui prezzo è τ_t ,¹²⁹ la vendita di alcuni di questi permessi consente di aumentare le risorse destinate al consumo o all'investimento, mentre l'acquisto di quote addizionali comporta la cessione di una parte dell'output prodotto. L'identità che definisce l'uguaglianza tra risorse e impieghi si modifica quindi nel modo seguente:

$$y_{I,t} + \tau_t(\Xi_{I,t} - E_{I,t}) = c_{I,t} + i_{I,t} \quad (48)$$

¹²⁹Si ipotizza che il numero di permessi di emissione assegnato alla I -esima regione sia concordato a livello globale e che il loro prezzo sia lo stesso in tutte le aree geografiche. Entrambe le variabili sono considerate esogene dalle famiglie e dalle imprese della regione.

dove $y_{I,t}$, $c_{I,t}$ e $i_{I,t}$ sono, rispettivamente, PIL, consumi e investimento della regione I -esima.¹³⁰ L'equazione precedente si applica anche al caso in cui lo strumento utilizzato per ridurre la produzione di CO_2 è la *carbon tax*: in questo caso τ_t rappresenta la tassa sulle emissioni e il prodotto $\tau_t \Xi_{I,t}$ sono i trasferimenti alle famiglie a titoli di compensazione.

Un vantaggio dei modelli a più regioni è quello di consentire di differenziare le temperature nelle diverse parti del globo. I paesi in cui le temperature aumentano di più saranno quelli che dovranno sopportare danni maggiori e saranno quindi più incentivati ad adottare politiche di riduzione delle emissioni. Al contrario, le ragioni meno colpite o addirittura favorite dai cambiamenti climatici saranno invece portate a privilegiare l'inazione o ad adottare politiche opportunistiche.

Per modellare le temperature locali ($T_{I,t}$) viene adottato un approccio semplificato, che ipotizza che la temperatura globale sia una statistica sufficiente per derivare quella delle diverse regioni. Si ha quindi che

$$T_{I,t} = \bar{T}_I + a(T_t - T_{t_0}) \quad (49)$$

dove \bar{T}_I è la temperatura della regione I al tempo t_0 , mentre il parametro a misura come cambia $T_{I,t}$ al variare della temperatura globale. Da $T_{I,t}$ poi dipende il danno per unità di prodotto arrecato dai cambiamenti climatici: $1 - \Omega(T_{I,t})$.

Le equazioni relative alla circolazione del biossido di carbonio e all'impatto della CO_2 sulla temperatura restano invariate, una volta aggregate le emissioni di ciascuna regione. Il modello RICE considera anche, come variabile esogena, la quota di CO_2 immessa nell'atmosfera in conseguenza di modifiche all'uso della terra.

10 MVI e politica monetaria

Le politiche climatiche devono essere valutate su orizzonti temporali lunghi, che coprono decenni, se non addirittura secoli. Per questa ragione gli MVI hanno in genere come unità temporale il decennio e astraggono dalle dinamiche congiun-

¹³⁰Nordhaus considera anche il caso in cui sottoinsiemi di paesi si accordano sul numero di permessi di emissione, sulla loro distribuzione e sul loro prezzo. Questo consente di considerare non soltanto equilibri cooperativi o competitivi, ma anche gli effetti delle scelte di una o più coalizioni di regioni che concordano su una strategia per affrontare l'esternalità climatica. In letteratura queste coalizioni vengono denominate *trading block*.

turali. La politica monetaria, che è il principale strumento di stabilizzazione ciclica, non è quindi essenziale e spesso non compare. Esistono però eccezioni.

Alcuni lavori recenti cercano di valutare il ruolo che la politica monetaria può avere nella transizione energetica, sia attraverso l'impiego di misure standard (la variazione dei tassi di interesse di brevissimo termine) sia facendo ricorso a strumenti non convenzionali (i programmi di acquisto titoli). Le conclusioni di questi lavori in genere confermano che il contributo che gli istituti di emissione possono dare è marginale e ancillare rispetto all'azione dei governi.

10.1 Politiche monetarie attente agli obiettivi climatici

Nakov e Thomas¹³¹ usano un modello Neo-Keynesiano per studiare l'impatto di politiche monetarie che, oltre a perseguire un obiettivo di inflazione, cercano di mitigare i danni prodotti dall'aumento dei gas serra. In aggiunta alle relazioni che descrivono la massimizzazione dell'utilità da parte dei consumatori e del profitto da parte delle imprese, il modello include anche un'equazione, identica alla (4), che lega la concentrazione di gas serra nell'atmosfera all'attività produttiva, e un'equazione, simile alla (15), che misura la perdita di prodotto dovuta ai cambiamenti climatici.

Le famiglie consumano un paniere di beni, prodotti da imprese che operano in mercati di concorrenza monopolistica; ciascun bene è frutto della combinazione di lavoro ed energia, che è in parte verde e in parte di natura fossile. L'energia a sua volta è ottenuta utilizzando il solo lavoro ed è soggetta a un'imposta che grava sulla quantità prodotta e serve a trasferire il costo dell'esternalità climatica ai produttori di combustibili inquinanti: per questa ragione, solo l'energia di natura fossile è tassata. Le imprese che producono beni di consumo modificano con una probabilità data il prezzo di vendita, tenendo conto dell'andamento futuro atteso dei costi marginali di produzione. Il governo, che mantiene in ogni periodo il bilancio in equilibrio, utilizza i proventi della *carbon tax* per versare sussidi ai produttori,¹³² ed effettuare trasferimenti ai cittadini.

Nakov e Thomas mostrano che se l'imposta sulle emissioni è fissata al livello ottimale, la politica monetaria può concentrarsi esclusivamente sull'obiettivo di inflazione. La ragione è ovvia: la politica fiscale riesce da sola a elimina-

¹³¹Cfr. Nakov e Thomas (2023).

¹³²In mercati di concorrenza monopolistica il prodotto è inferiore a quello che si avrebbe in concorrenza perfetta; il governo, versando un sussidio alle imprese, elimina questa distorsione e si pone nella condizione di fissare la *carbon tax* al valore ottimale, internalizzando completamente l'esternalità climatica.

re l'esternalità climatica e quindi non ha bisogno del contributo della politica monetaria.

Se però la *carbon tax* è inferiore – almeno temporaneamente – a quella ottimale, le emissioni di CO_2 sono eccessivamente elevate e provocano danni all'ambiente e alle persone, riducendo la quantità di prodotto destinato al consumo. In questo caso la banca centrale può aumentare il benessere sociale mantenendo il tasso di interesse più alto di quanto richiesto dal perseguimento dell'obiettivo della stabilità dei prezzi: così facendo il prodotto si attesta su un livello inferiore a quello naturale, con meno emissioni e danni più contenuti. Nakov e Thomas trovano però che dal punto di vista quantitativo l'effetto della politica monetaria è trascurabile ed è sostanzialmente indistinguibile da quello che si avrebbe se la banca centrale si curasse unicamente dell'obiettivo di inflazione. La ragione è che il tasso di interesse è uno strumento poco efficace, in quanto penalizza allo stesso modo l'uso di energia verde e di energia fossile, e non può quindi supplire all'insufficienza della *carbon tax*.

La banca centrale ha però altri strumenti a disposizione per perseguire obiettivi climatici: può per esempio intraprendere programmi di acquisto di obbligazioni societarie, favorendo imprese "verdi" a scapito di quelle con elevate emissioni.¹³³ I due autori ipotizzano che una parte dei costi di produzione delle imprese fornitrici di energia debba essere finanziata con titoli di debito, collocati sul mercato a un rendimento superiore a quello dei titoli privi di rischio: questo premio è dovuto ai costi di transazione, che crescono all'aumentare della quantità di debito che deve essere assorbita dal mercato.¹³⁴ Il servizio del debito è una componente addizionale del costo marginale, che in equilibrio porta a prezzi più elevati e una minor quantità prodotta. Gli acquisti della banca centrale possono quindi ridurre la quantità di obbligazioni "verdi" che devono essere assorbiti dal mercato, riducendone i rendimenti e quindi i costi delle imprese produttrici di energia verde, che in tal modo possono praticare un prezzo più conveniente di quello dell'energia fossile.

Anche in questo caso la politica monetaria non contribuisce in alcun modo alle politiche climatiche se la *carbon tax* è fissata al livello ottimale τ_f^* ; il beneficio principale che un programma di acquisto titoli può arrecare è quello di eliminare la distorsione dovuta ai costi di transazione, consentendo al tasso di interesse di politica monetaria di stabilizzare l'inflazione e massimizzare il benessere sociale.

¹³³Il termine usato da Nakov e Thomas per il programma di acquisti è *Green QE*.

¹³⁴Nel modello di Nakov e Thomas i costi di transazione sono positivi nel caso di scambi tra privati, mentre sono nulli se gli acquisti sono effettuati dalla banca centrale.

Se invece, almeno inizialmente, la *carbon tax* è fissata a un livello τ_f' inferiore, ma prossimo, al valore ottimale τ_f^* , allora la banca centrale può svolgere un ruolo indipendente nel favorire la transazione energetica, acquistando una quota delle obbligazioni delle imprese che producono energia pulita: in questo modo il prezzo relativo delle due differenti fonti di energia si modifica, suppiendo parzialmente all'inadeguatezza dell'imposta sulle emissioni. Questa strategia funziona perché il servizio del debito è una componente dei costi di produzione e quindi incide sul prezzo dell'energia: acquistando solo (o soprattutto) titoli "verdi" la banca centrale riduce il prezzo dell'energia pulita e mantiene elevato il prezzo di quella fossile, in maniera analoga a quanto fatto da una *carbon tax*.

In genere però un *Green QE* è solo parzialmente efficace: se il gap $\tau_f^* - \tau_f'$ è elevato, la banca centrale dovrebbe vendere (allo scoperto) obbligazioni delle imprese inquinanti per portare il prezzo dell'energia fossile allo stesso livello che si avrebbe con una *carbon tax* al valore ottimale τ_f^* . Usando una calibrazione dei parametri del modello appropriata per l'area dell'euro, Nakov e Thomas mostrano che il contributo di un programma di acquisto titoli è minimo e non incide in modo significativo sulla concentrazione di gas serra nell'atmosfera. La ragione è che per le obbligazioni di elevato merito di credito – come quelle acquistate dalle banche centrali – lo spread rispetto ai rendimenti privi di rischio è troppo basso per consentire quell'aggiustamento del prezzo delle fonti di energia necessario a replicare gli effetti di una *carbon tax*: il contributo del *Green QE* alla riduzione delle emissioni è dovuto principalmente alla riduzione del prezzo dell'energia verde, piuttosto che all'aumento di quello dell'energia fossile.

10.2 Programmi di acquisto e "green economy"

Anche il lavoro di Ferrari e Nispi Landi¹³⁵ studia in che misura un programma di acquisti, sbilanciato verso obbligazioni di emittenti verdi, può contribuire alla transizione energetica.

Il modello utilizzato è Neo-Keynesiano, ma differisce in diversi aspetti da quello di Nakov e Thomas. Innanzitutto non include una funzione di danno, come per esempio la (15), ma misura indirettamente il costo dell'aumento della concentrazione di gas serra nell'atmosfera attraverso la funzione di utilità, in cui compaiono come argomenti la quantità detenuta di obbligazioni "green" (con

¹³⁵Cfr. Ferrari e Nispi Landi (2023).

segno positivo) e "brown" (con segno negativo).¹³⁶ Questa soluzione consente agli autori di ottenere che in equilibrio i rendimenti di obbligazioni "green", "brown" e titoli di stato siano diversi: l'utilità diretta fornita dai titoli "green" consente agli emittenti di collocarli a un rendimento inferiore a quello dei titoli di stato; la disutilità arrecata da quelli "brown" comporta invece un tasso di interesse superiore. Il cosiddetto "greenium" è il differenziale di rendimento tra i due titoli privati.

In secondo luogo le emissioni non sono il frutto della combustione di energia fossile, che non è una variabile inclusa nel modello, ma sono il sottoprodotto della produzione di alcuni beni: l'equazione specificata è sostanzialmente identica alla (D.9) del modello DICE e mette le emissioni in relazione diretta con l'output delle imprese "brown" e inversa con il tasso di efficientamento energetico (μ_t).¹³⁷

Le imprese infine emettono obbligazioni per acquistare i beni capitali: la distinzione tra titoli "green" e "brown" dipende esclusivamente dall'attività svolta dall'impresa emittente.

Per valutare l'apporto della politica monetaria alla decarbonizzazione, in aggiunta all'imposizione di una *carbon tax*, Ferrari e Nispi Landi simulano il loro modello ipotizzando un programma di acquisti che cresce gradualmente fino ad arrivare al livello che azzerava le emissioni. Al fine di individuare il disegno più appropriato, gli autori considerano per il programma di acquisti opzioni alternative, differenti per durata e profilo temporale.

L'imposizione della *carbon tax* riduce sia l'attività economica sia l'inflazione: il primo effetto è scontato; il secondo no. Una tassa sulle emissioni aumenta i costi marginali delle imprese e quindi dovrebbe spingere verso l'alto l'inflazione, cosa che invece non accade. La ragione è che la *carbon tax* è un prelievo permanente, che, contraendo la domanda aggregata presente e futura, produce un effetto reddito negativo, che risulta dominante. La pressione al ribasso su crescita e dinamica dei prezzi si traduce in una discesa dei tassi di politica monetaria e in una riduzione del rendimento dei titoli pubblici. Anche gli oneri

¹³⁶L'utilizzo della funzione di utilità per tener conto dell'esternalità climatica è un'alternativa alla specificazione di una funzione di danno. Rispetto all'esempio riportato nella sezione 3.4.2, al posto della quantità di gas serra immessa nell'atmosfera Ferrari e Nispi Landi usano come argomento della funzione di utilità le obbligazioni detenute dall'agente rappresentativo: quelle "green" contribuiscono ad aumentare l'utilità; quelle "brown" la riducono.

¹³⁷Nel modello di Ferrari e Nispi Landi il prodotto finale consiste in un paniere di beni, ciascuno dei quali a sua volta è ottenuto combinando un bene intermedio "green" e uno "brown". La produzione di entrambi i beni intermedi richiede lavoro e capitale: le imprese sono in grado di compensare con fondi propri il lavoro utilizzato, ma devono collocare sul mercato titoli di debito per acquistare i beni capitali. La distinzione tra i due beni dipende dal fatto che solo la produzione dei secondi determina emissioni di gas serra.

finanziari sulle obbligazioni private scendono, anche se in modo differenziato: più per i titoli "brown" e meno per quelli "green". La tassa sulle emissioni colpisce infatti solo le imprese inquinanti, che quindi riducono i loro investimenti e la quantità di debito necessaria a finanziarli: questo fa sì che i rendimenti delle imprese "brown" si riducano relativamente di più, riducendo il "greenium".

L'attuazione di un *Green QE*, in aggiunta alla riduzione dei tassi di *policy*, rafforza l'effetto espansivo dell'azione dell'autorità monetaria. Per comprare obbligazioni verdi, la banca centrale deve offrire prezzi crescenti (e quindi ottenere rendimenti via via più bassi), che compensano i consumatori della perdita di utilità legata alla cessione dei titoli; i minori interessi pagati sul debito delle imprese non inquinanti consentono una riduzione del prezzo e un incremento dell'output. Rispetto a uno scenario in cui vi è solo una *carbon tax*, la produzione dell'intera economia aumenta, inizialmente sospinta dalla maggior domanda di investimenti e successivamente anche dalla maggior spesa per consumi; le emissioni scendono, grazie al minor peso delle imprese "brown". L'espansione dell'attività economica si traduce in un aumento dell'inflazione, che spinge la banca centrale ad alzare il tasso di interesse di politica monetaria. L'acquisto di obbligazioni verdi riduce significativamente i loro rendimenti e consente un forte incremento del "greenium".

Gli autori trovano che il *Green QE* (i) è meno efficace se attuato in modo graduale, che (ii) i suoi effetti crescono più che proporzionalmente rispetto all'ammontare degli acquisti e che (iii) il suo contributo alla decarbonizzazione è maggiore quando la *carbon tax* è assente o comunque inferiore al livello ottimale. Il suo impatto però è sostanzialmente irrilevante se misurato in termini di riduzione della concentrazione di gas serra nell'atmosfera,¹³⁸ nonostante una calibrazione del modello estremamente favorevole.¹³⁹

Ferrari e Nispi Landi stimano anche gli effetti di un programma di *credit easing*, ovvero dell'acquisto di titoli verdi finanziato dalla vendita di obbligazioni di imprese inquinanti, e trovano che la sua efficacia è fortemente limitata dall'impossibilità di aumentare le dimensioni del portafoglio.¹⁴⁰

¹³⁸Secondo gli autori l'impatto diventa irrilevante se le altre banche centrali non seguono l'esempio della BCE.

¹³⁹Sulla base delle loro simulazioni, Ferrari e Nispi Landi trovano che per l'area dell'euro la riduzione della quantità di gas serra nell'atmosfera non supera lo 0,2%, anche nel caso di programmi di acquisto di dimensione ben superiore a quelli effettuati nell'ultimo decennio e di un'elevata elasticità di sostituzione tra beni "green" e "brown".

¹⁴⁰L'attuazione di un programma di *credit easing*, come quello prospettato da Ferrari e Nispi Landi, presuppone che la banca centrale abbia in precedenza acquistato titoli di debito del settore privato. Gli autori considerano il caso della BCE, il cui portafoglio di obbligazioni societarie ha raggiunto un valore pari all'1,5% del PIL dell'area dell'euro, composto per circa

10.3 Decarbonizzazione dei portafogli

Pur nella consapevolezza dei ridotti spazi di manovra, le banche centrali negli ultimi anni non hanno lesinato sforzi nel tentativo di promuovere la consapevolezza del mondo finanziario sull'importanza del problema dei cambiamenti climatici, incoraggiando la diffusione di informazioni sulla sostenibilità e patrocinando, anche con l'esempio, l'integrazione dei principi ESG (*Environmental, Social, and Governance*) nella gestione degli investimenti.¹⁴¹

Un obiettivo oggi condiviso da molte banche centrali è quello di ridurre l'intensità carbonica dei propri portafogli, siano essi il risultato di programmi di acquisto condotti per preservare la stabilità dei prezzi oppure di investimenti finanziari volti a contribuire alla copertura dei costi di gestione e al mantenimento della solidità patrimoniale. Anche se la decarbonizzazione dei portafogli può essere effettuata in svariati modi, la strategia largamente più diffusa è quella di concentrare gli investimenti in imprese considerate "verdi", evitando quelli in società ad alte emissioni, con l'obiettivo di ridurre gli oneri finanziari per le prime e aumentarli per le seconde, in modo da favorire la transizione ecologica.

Per quanto suggestiva, questa strategia non è necessariamente efficace e può addirittura risultare controproducente. Questa è la tesi di Hartzmark e Shue,¹⁴² che sostengono che il *modus operandi* dei fondi con obiettivi di sostenibilità non contribuisce all'abbattimento delle emissioni, ma al contrario riesce solo a rendere più "marroni"¹⁴³ le imprese "marroni", senza riuscire a fornire a quelle "verdi" incentivi adeguati a ridurre ulteriormente le loro emissioni.

Un errore comune alle strategie di investimento sostenibile è quella di perseguire obiettivi basati sulla riduzione delle emissioni in percentuale, anziché in livello; un esempio sono le strategie che si prefiggono l'allineamento con l'accordo di Parigi, che comporta un calo annuo del 7% dell'impronta carbonica. Per capire perché questo approccio alla decarbonizzazione è controproducente, basta considerare che le imprese inquinanti hanno in media livelli di emissioni centinaia di volte superiori a quelli delle imprese verdi,¹⁴⁴ per cui anche riduzioni

l'80% da titoli "brown". Nelle loro simulazioni viene adottata l'ipotesi che i titoli "brown" vengano venduti per intero, finanziando l'acquisto di obbligazioni "green".

¹⁴¹I principi ESG sono i criteri utilizzati per valutare la sostenibilità e l'impatto etico di un'azienda, un asset o un investimento.

¹⁴²Cfr. Hartzmark e Shue (2024).

¹⁴³Traducendo letteralmente dall'inglese, sono definite "marroni" le imprese caratterizzate da una elevata impronta carbonica, in antitesi a quelle denominate "verdi", a cui è invece attribuibile un quantitativo ridotto di emissioni.

¹⁴⁴Hartzmark e Shue, partendo da un campione di qualche migliaia di osservazioni, ordinano le imprese sulla base della loro impronta carbonica, identificando come "marroni" quelle che appartengono al primo quintile, "verdi" quelle che si trovano nell'ultimo e "neutre" tutte le

percentualmente modeste dell'impronta carbonica delle prime possono contribuire in modo molto più rilevante alla transizione ecologica di azioni apparentemente più ambiziose delle seconde. Inoltre, anche in una situazione ipotetica in cui nessuno degli emittenti modificasse la quantità di gas serra rilasciata nell'atmosfera, i portafogli che seguono strategie allineate con l'accordo di Parigi potrebbero conseguire prestazioni positive semplicemente aumentando il peso dei titoli verdi, contribuendo solo sulla carta al processo di decarbonizzazione (*paper decarbonization*).

Secondo Hartzmark e Shue le strategie di investimento sostenibile sono inefficaci anche perché non sono in grado di fornire incentivi appropriati alle imprese. Dirottare risorse dagli emittenti marroni a quelli verdi serve ad aumentare gli oneri finanziari dei primi; poiché però gli investimenti in tecnologie a basse emissioni sono caratterizzate da costi immediati e ricavi che si materializzano solo nel lungo termine, l'aumento del costo del capitale ne riduce il valore attuale. Il risultato è che le imprese inquinanti saranno incentivate a posporre o cancellare gli investimenti necessari alla transizione verde, diventando sempre più marroni.

Per verificare se la loro tesi trova conforto nell'evidenza empirica, gli autori effettuano una serie di regressioni, partendo dall'equazione seguente:

$$\Delta \tilde{e}_{i,t} = \alpha_i + \lambda_t + (\beta_1 I_i^B + \beta_2 I_i^N + \beta_3 I_i^G) ret_{i,t-1} + \varsigma_{i,t} \quad (50)$$

dove $\tilde{e}_{i,t}$ è il rapporto tra emissioni e fatturato, α_i e λ_t sono effetti fissi, $ret_{i,t-1}$ il rendimento dell'azione dell'emittente i nel periodo precedente (quindi una variabile inversamente proporzionale al costo del capitale) e I_i^J , dove $J = B, N, G$, è una variabile di comodo che assume valore uno per l'impresa J (ovvero marrone, neutra o verde) e zero per tutte le altre; $\varsigma_{i,t}$ è il residuo dell'equazione.

Se i presupposti su cui si basano le strategie di investimento sostenibile sono corretti, i dati dovrebbero confermare che $\beta_3 < 0$ (perché le imprese verdi riducono le emissioni quando i loro oneri finanziari si riducono, vale a dire quando $ret_{i,t-1}$ è superiore alla media) e che $\beta_1 > 0$ (perché gli emittenti inquinanti rilasciano meno gas serra quando il costo del capitale di rischio aumenta, vale a dire quando $ret_{i,t-1}$ è inferiore alla media). L'evidenza empirica sembra invece dimostrare il contrario: β_3 non è statisticamente diverso da zero, mentre β_1 ha il segno sbagliato e un valore implausibilmente elevato.

altre. Gli autori mostrano che le imprese inquinanti in media rilasciano nell'atmosfera 261 volte più gas serra di quelle virtuose, per cui un calo dello 0,1% delle emissioni delle prime contribuisce alla transizione ecologica più di una riduzione del 25% delle seconde.

Il punto debole della regressione (50) è che i risultati potrebbero essere distorti a causa di *reverse causality*¹⁴⁵ o per l'omissione di variabili rilevanti.¹⁴⁶ Per verificare la validità di questa ipotesi gli autori ristimano l'equazione (50) sostituendo $ret_{i,t-1}$, il rendimento delle azioni dell'impresa i , con quelli del settore di appartenenza,¹⁴⁷ nella presunzione che le scelte aziendali sulle emissioni non possano avere un impatto sulla performance del settore, facendo venire meno la possibilità dell'esistenza di distorsioni dovute a *reverse causality* o omissione di variabili. I risultati ottenuti non differiscono nella sostanza dai precedenti: la stima di β_1 resta negativa, elevata e statisticamente significativa; quella di β_3 acquisisce lo stesso segno di β_1 , anche se rimane molto più piccola in valore assoluto.

Hartzmark e Shue effettuano ulteriori verifiche per confermare la robustezza dei loro risultati. Innanzitutto, considerando che la riduzione delle emissioni richiede investimenti che producono risultati solo dopo alcuni anni, gli autori ristimano l'equazione (50) modificando la definizione della variabile dipendente, che diventa: $\Delta^5 \tilde{e}_{i,t} \equiv \tilde{e}_{i,t+5} - \tilde{e}_{i,t}$. In secondo luogo, gli autori utilizzano come regressore una misura del costo del capitale che non risente degli shock di produttività. Nessuna di queste o altre analisi di robustezza riesce però a confutare i risultati iniziali.

Secondo Hartzmark e Shue, per essere efficaci le strategie di investimento sostenibile dovrebbero ribaltare il loro *modus operandi*, concentrandosi sulle industrie marroni, fornendo incentivi anziché penalizzazioni e premiando quelle più impegnate nella transizione ecologica.

Indicazioni analoghe sono contenute in un lavoro di Fraser e Fiedler,¹⁴⁸ che studia la relazione tra emissioni attribuibili al portafoglio ed impegno effettivo delle imprese finanziate verso la transizione energetica, senza trovare una stretta connessione tra le due.¹⁴⁹ Gli autori mostrano inoltre che il grado di decarbonizzazione dei portafogli varia sensibilmente a seconda della metrica utilizzata e che la performance non dipende dall'inclusione di società con obiettivi clima-

¹⁴⁵ *Reverse causality* significa inversione della causalità. Nel caso in questione significa che non è il costo del capitale a influenzare le emissioni, ma il contrario, perché per esempio il prezzo delle azioni sale (e quindi il costo del capitale scende) sulla base dell'aspettativa che l'impresa stia investendo per trasformarsi da marrone in verde.

¹⁴⁶ L'esempio citato da Hartzmark e Shue è quello della nomina di un nuovo Amministratore Delegato, determinato ad accelerare la transizione ecologica dell'impresa.

¹⁴⁷ I rendimenti medi del settore sono calcolati escludendo l'impresa i .

¹⁴⁸ Cfr. Fraser e Fiedler (2023).

¹⁴⁹ La ricomposizione dei portafogli verso società "verdi" è responsabile del disallineamento tra emissioni attribuibili ai titoli in portafoglio ed emissioni effettive.

tici in linea con le indicazioni della *ScienceBased Targets initiative* o *Transition Pathway Initiative*.

Le critiche di Hartzmark e Shue sono riprese da Angelini,¹⁵⁰ che sottolinea che il perseguimento della decarbonizzazione di un portafoglio può ostacolare, anziché favorire, la transizione verde. Innanzitutto, indirizzare finanziamenti verso imprese virtuose serve a poco, visto che la loro transizione è già sostanzialmente compiuta; sono le imprese energivore, ma desiderose di abbattere le proprie emissioni, che devono essere aiutate a investire in energia pulita. In secondo luogo, l'aspirazione di rendere economicamente insostenibili le produzioni inquinanti si basa sul presupposto che esse possano scomparire senza conseguenze; in realtà, le interconnessioni tra i settori dell'economia fanno sì che le imprese ad alte emissioni forniscano spesso a quelle verdi prodotti intermedi che sono scarsamente sostituibili: un aumento rilevante del loro costo, o la loro eventuale indisponibilità, si tradurrebbe quindi in un ostacolo alla transizione verso un'economia a zero emissioni.

10.4 La politica monetaria aiuta la decarbonizzazione?

L'evidenza presentata nelle sezioni precedenti sembrerebbe suggerire che le banche centrali non dispongano di strumenti adeguati per contribuire in modo rilevante al processo di decarbonizzazione.

Per azzerare le emissioni è necessario rendere il prezzo dei combustibili fossili non competitivo rispetto a quello delle rinnovabili e dell'energia nucleare, compito ben al di fuori della portata della politica monetaria. I tassi di riferimento, l'arma principale di cui dispongono le banche centrali, non consentono di modificare il prezzo relativo di due (panieri di) beni: possono contribuire a ridurre le emissioni frenando l'attività economica, ma al costo di abbassare il benessere sociale e di disincentivare gli investimenti per la transizione energetica.¹⁵¹ I programmi di acquisto, ancorché disegnati per favorire le imprese verdi, sono soggetti a limiti quantitativi stringenti e in ogni caso agiscono su un prezzo – il costo del debito – che non è quello che consente l'internalizzazione dell'esternalità climatica. L'adozione di strategie di investimento sostenibile per

¹⁵⁰Cfr. Angelini (2024).

¹⁵¹In una fase di rallentamento economico l'appetito per il rischio si riduce e il costo del capitale aumenta; come descritto nella sezione 10.3, il deterioramento delle proprie condizioni finanziarie spinge le imprese (marroni) a rimandare gli investimenti per la transizione energetica, che comportano costi immediati ma ricavi ritardati.

la gestione dei portafoglio delle banche centrali, siano essi di politica monetaria o meno, è soggetta alle critiche di Hartzmark e Shue e a quelle di Angelini.

11 Gli MVI in azione

Il vantaggio principale degli MVI è quello di permettere la valutazione delle politiche climatiche (*policy evaluation*), tenendo conto non solo dell'impatto dell'attività economica sulla concentrazione di CO_2 e sulla temperatura, ma anche della retroazione del clima su produzione e consumo. Rendendo esplicita la relazione bidirezionale tra attività umana e danni all'ambiente, diventa possibile valutare congiuntamente sia i benefici sia i costi delle politiche di controllo delle emissioni, privilegiando quelle che consentono di conseguire l'obiettivo di ridurre la concentrazione di gas serra senza danneggiare eccessivamente l'attività economica.

Mantenere standard adeguati di crescita è importante non solo perché garantisce maggiori consumi e quindi benessere per la popolazione, ma anche perché consente più investimenti in tecnologie che possono velocizzare la transizione energetica e perché i cambiamenti climatici non sono l'unica emergenza da affrontare, come ha dimostrato la pandemia di Covid-19 degli scorsi anni.

Esistono diversi criteri che possono essere adottati per disegnare politiche climatiche: il primo, quello più ovvio, è massimizzare il benessere sociale, bilanciando costi e benefici delle emissioni di gas serra; il secondo, più in linea con le indicazioni delle istituzioni internazionali, è conseguire risultati prefissati in termini di decarbonizzazione, minimizzando i costi da sostenere.

Quest'ultimo criterio è quello che ispira gli accordi internazionali, in particolare l'Articolo 2 della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC, *United Nations Framework Convention on Climate Change*), che è un trattato internazionale ambientale, adottato nel 1992 ed entrato in vigore nel 1994, che nel corso del tempo è stato sottoscritto da pressoché tutte le nazioni.¹⁵² L'Articolo afferma che l'obiettivo prioritario dei paesi sottoscrittori

¹⁵²L'UNFCCC è stato stilato in occasione della Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite, tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992; la parte dell'Art.2 che si occupa delle politiche climatiche è la seguente: "L'obiettivo ultimo [...] è raggiungere [...] la stabilizzazione delle concentrazioni di gas serra nell'atmosfera a un livello che eviti interferenze antropiche pericolose con il sistema climatico. Tale livello dovrebbe essere raggiunto entro un arco temporale sufficiente a consentire agli ecosistemi di adattarsi naturalmente, a garantire che la produzione alimentare non sia minacciata e a permettere uno sviluppo economico sostenibile". Tol (2019) considera le prescrizioni dell'Art.2 come eccessivamente vaghe e di discutibile validità scientifica: mettere un tetto alla concentrazione di gas serra nell'atmosfera

della Convenzione è quello di stabilizzare la concentrazione di gas serra nell'atmosfera a un livello che eviti interferenze dannose con il clima e che non vada a scapito dello sviluppo economico, senza però specificare quale sia questo livello. Perché venga fissato un obiettivo quantitativo bisogna aspettare il 1995, quando il governo tedesco traduce le prescrizioni dell'Art. 2 dell'UNFCCC in un tetto del 2°C all'aumento medio della temperatura rispetto al periodo pre-industriale. Lo stesso obiettivo viene adottato l'anno dopo dal Consiglio dell'Unione europea; successivamente viene incorporato nei Rapporti dell'IPCC; nel 2015 diventa parte integrante dell'Accordo di Parigi.¹⁵³

Per conseguire obiettivi di questa natura e ricercare le strategie climatiche appropriate, è necessario avere un termine di confronto, ovvero una "simulazione di base", che tipicamente coincide con uno scenario in cui non vengono adottate politiche di riduzione delle emissioni in aggiunta a quelle già esistenti.

11.1 Le proiezioni del 2017 del modello DICE di Nordhaus

L'articolo del 2017 di Nordhaus¹⁵⁴ costituisce un esempio di come gli MVI possano essere utilizzati per valutare vantaggi e svantaggi delle strategie di mitigazione, consentendo di scartare quelle meno efficaci o più costose e di individuare quelle che permettono di contenere al livello desiderato l'aumento delle temperature, senza danneggiare più del necessario l'attività economica (e quindi il benessere sociale).

Nordhaus disegna la simulazione di base (*baseline*) partendo dalle politiche di mitigazione in vigore nel 2015, che stima corrispondere a un prezzo di 2 dollari per tonnellata di CO_2 emessa, e assumendo che tale prezzo aumenti a un tasso del 2% l'anno. Sotto queste ipotesi, la concentrazione nell'atmosfera di biossido di carbonio raddoppierebbe a fine secolo e la temperatura globale aumenterebbe di quasi 3,5°C.

significa azzerare le emissioni, che non necessariamente costituisce la soluzione ottimale; la stabilizzazione dei gas serra può essere fatta a infiniti livelli, cui corrispondono temperature e quindi danni diversi; quale sia il trade-off tra riduzione delle emissioni e mantenimento di livelli adeguati di crescita economica non è specificato, così come il lasso di tempo in cui l'obiettivo prescritto debba essere conseguito.

¹⁵³Secondo Tol l'obiettivo di mantenere l'aumento della temperatura entro il 2% non ha alcuna giustificazione scientifica: è il parto delle speculazioni di undici professori tedeschi ed è stato poi adottato a livello internazionale per mancanza di alternative. Cfr. Tol (2019), pp. 127-130.

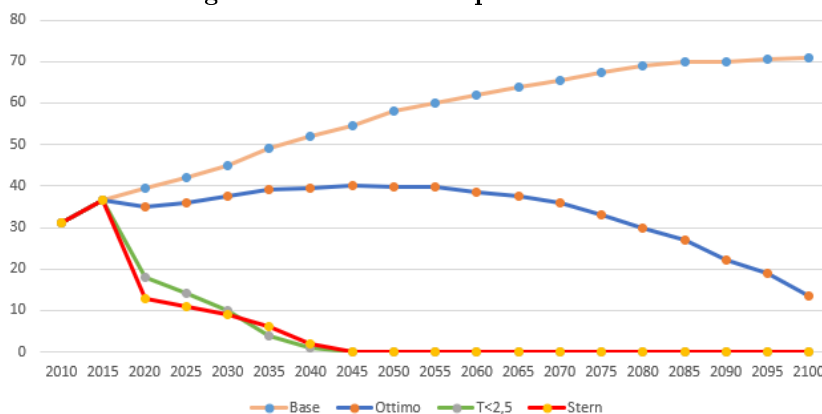
¹⁵⁴Cfr. Nordhaus (2017), dove viene usata un versione del modello DICE lievemente diversa da quella descritta nella sezione 8. Oltre alla calibrazione dei parametri, una delle principali differenze riguarda la scelta dell'unità di tempo, che non è più il decennio, ma il quinquennio.

Il modello DICE viene simulato nel periodo 2015-2100, considerando quattro scenari:

1. **Baseline:** nessuna politica di riduzione delle emissioni viene adottata in aggiunta a quelle in vigore nel 2015;
2. **Ottimale:** le misure contro i cambiamenti climatici vengono scelte in modo da ottimizzare il benessere sociale, uguagliando costo e beneficio marginale di un'unità addizionale di emissioni;
3. **T<2,5:** vengono adottate misure che massimizzano il benessere sociale e al tempo stesso consentono di limitare a 2,5°C l'aumento delle temperature rispetto ai livelli di inizio '900;
4. **Stern:** si adottano politiche che garantiscono il più favorevole profilo intertemporale dei consumi,¹⁵⁵ senza però penalizzare le generazioni future. A tal fine viene utilizzato il tasso di sconto reale suggerito da Stern, ovvero lo 0,1%, che comporta azioni immediate e vigorose.

Le principali caratteristiche dei quattro scenari sono sintetizzate nelle Figure 6 e 7 e nella Tavola 2.

Fig. 6: Emissioni nei quattro scenari



Fonte: Nordhaus (2017). L'asse delle ordinate riporta, per ciascuno dei quattro scenari, le emissioni industriali globali annuali, misurate in termini di miliardi di tonnellate di CO₂ (GtCO₂). L'unità di tempo è il quinquennio. 'Base' è lo scenario in cui non vengono prese misure di riduzione delle emissioni oltre a quelle in vigore nel 2015; 'Ottimo' è quello in cui le emissioni massimizzano il benessere sociale; 'T<2,5' è lo scenario in cui le emissioni consentono di contenere in 2,5°C l'incremento della temperatura; 'Stern' è quello in cui il tasso di sconto annuale è molto basso, pari a 0,1.

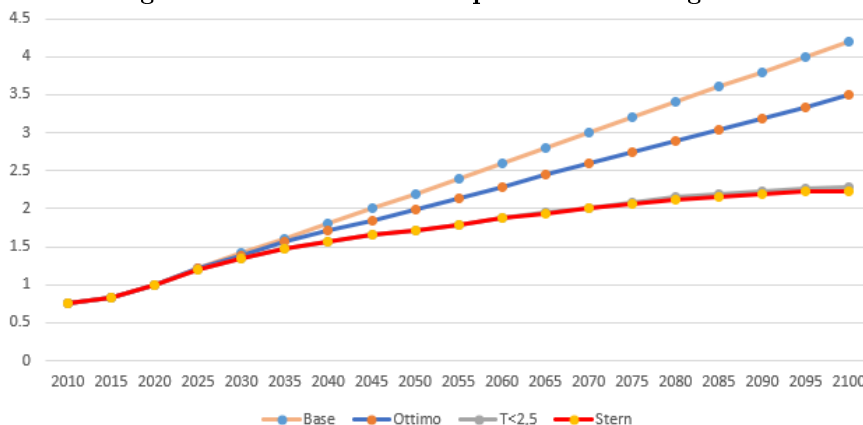
¹⁵⁵Poiché la funzione di utilità del modello DICE dipende solo dal consumo (presente e futuro), massimizzare il benessere sociale significa ottimizzare il profilo intertemporale del consumo.

Nello scenario di base (*baseline*) le emissioni raddoppiano, in conseguenza del fatto che nessuna misura di mitigazione viene adottata (cfr. Fig. 6); in quello ottimale, invece, dopo qualche periodo di sostanziale stabilità, le emissioni iniziano a scendere, raggiungendo a fine secolo valori inferiori di oltre due terzi a quelli iniziali. I progressi nel contenimento del rilascio di gas serra lasciano intuire che in un altro decennio l'obiettivo di azzeramento verrebbe raggiunto.

Radicalmente diversa è la situazione negli altri due scenari, che presentano notevoli similarità: in meno di un trentennio le emissioni di CO_2 sono completamente eliminate. Ciò che consente di ottenere questo risultato è la concentrazione dei costi di abbattimento nei primissimi periodi della simulazione, addossandone l'onere alla generazione corrente e, in misura inferiore, a quella successiva.

La concentrazione di CO_2 nell'atmosfera raddoppia nella *baseline*, aumenta di circa il 50% in quello ottimale e rimane sostanzialmente invariata negli altri due.¹⁵⁶

Fig. 7: Aumento della temperatura media globale



Fonte: Nordhaus (2017). L'asse delle ordinate riporta, per ciascuno dei quattro scenari, l'aumento della temperatura media globale rispetto al 1900. L'unità di tempo è il quinquennio. 'Base' è lo scenario in cui non vengono prese misure di riduzione delle emissioni oltre a quelle in vigore nel 2015; 'Ottimo' è quello in cui le emissioni massimizzano il benessere sociale; 'T<2,5' è lo scenario in cui le emissioni consentono di contenere in 2,5°C l'incremento della temperatura; 'Stern' è quello in cui il tasso di sconto annuale è molto basso, pari a 0,1.

L'andamento della temperatura è significativamente diverso nei quattro scenari (cfr. Fig. 7). In assenza di misure correttive, il riscaldamento globale supererebbe i 4°C rispetto ai valori di inizio '900; anche con politiche che bilanciano al margine costi e benefici delle emissioni, l'aumento della temperatura

¹⁵⁶Cfr. Nordhaus (2017), Fig. 3 a pag.348, che per brevità non viene riportata.

supererebbe abbondantemente i 3°C. Risultati migliori si otterrebbero negli altri due scenari, ma non sarebbe comunque possibile rispettare il vincolo dei 2°C prescritto negli accordi internazionali, a causa sia dei ritardi con cui si sono intraprese politiche di mitigazione sia dell'inerzia che caratterizza il ciclo del carbonio e la risposta della temperatura.

L'apparente maggior efficacia degli scenari più ambiziosi, ovvero 'T<2,5' e 'Stern', non è però priva di costi: come evidenziato dalla Tavola 2, i minori danni provocati dal riscaldamento globale sono più che compensati dai costi necessari al contenimento delle emissioni. La perdita di PIL è sensibilmente superiore a quella dello scenario ottimale e perfino a quella che si avrebbe in assenza di interventi.¹⁵⁷

L'azzeramento delle emissioni minimizza il danno indotto dall'aumento della temperatura, ma al prezzo di costi esorbitanti per le politiche di mitigazione, che sono 6-8 volte superiori a quelli sostenuti nello scenario ottimale e concentrati nella prima parte dell'orizzonte di simulazione, a carico quindi prevalentemente della generazione presente. Il valore delle funzione di benessere sociale conferma che misure troppo sbilanciate verso un obiettivo climatico – e quindi troppo penalizzanti per le prospettive di crescita – sono sub-ottimali e possono comportare una riduzione dell'utilità perfino rispetto al caso di completa inerzia.

Tavola 2: Benessere sociale nei quattro scenari

Scenari	Base	Ottimo	T<2,5°C	Stern
Benessere sociale	4491	4521	4441	-
Danni e costi di mitigazione	135	105	163	202
<i>di cui:</i>				
Costi di mitigazione	0,4	20,1	117,6	155,7

Fonte: Nordhaus (2017). Il valore della funzione di benessere sociale è arbitrario ed è rilevante solo in quanto consente di ordinare i quattro scenari dal migliore al peggiore; quello dello scenario 'Stern' non è riportata, perché il diverso tasso di sconto rende il suo valore non confrontabile con quello degli altri scenari.

Un'altra dimensione rilevante per valutare gli scenari di decarbonizzazione è quella del costo sociale del carbonio (CSC), misurato dalla riduzione del benessere presente e futuro dovuto all'emissione di un'unità aggiuntiva di CO₂ (o unità equivalente di gas serra). Il CSC è uno dei principali strumenti usati nella definizione delle politiche di abbattimento delle emissioni, ma la sua stima è dif-

¹⁵⁷ Con un orizzonte temporale sufficientemente lungo non sarebbe ovviamente più vero che la perdita di PIL in caso di inazione sarebbe inferiore a quella degli scenari 'Stern' e 'T<2,5'.

ficile, perché richiede di tener traccia di tutte le fasi che portano dall'emissione di gas serra ai danni provocati dall'aumento della temperatura. Nordhaus sottolinea che, a differenza del modello DICE, non sono molti gli MVI che consentono di stimare il CSC.

Tavola 3: Costo Sociale del Carbonio

Scenario Anno	Base	Ottimo	T<2,5°C	Stern
2015	30,0	29,5	147,2	256,5
2020	35,7	35,3	183,2	299,6
2025	42,3	41,8	227,2	340,7
2030	49,5	49,2	280,4	381,7
2050	98,3	99,6	773,5	615,6

Fonte: Nordhaus (2017). L'anno indicato sulle righe è la data in cui siverificano le emissioni.

Come evidenziato dalla Tavola 3, lo scenario ottimale non comporterebbe un significativo aumento del CSC, che raggiungerebbe nel 2050 i \$100/ tCO_2 ; valori molto maggiori caratterizzano invece i due scenari più ambiziosi.

Nordhaus avverte però che questi risultati sono soggetti a un elevato grado di incertezza, perché dipendono strettamente dalla calibrazione del modello e, in particolare, dai parametri delle funzioni $\Omega(T_t)$ e Λ_t : danni più elevati a parità di temperatura oppure costi più bassi per l'abbattimento delle emissioni comporterebbero politiche ottimali molto più simili alle due più ambiziose.¹⁵⁸

Un risultato che rimane valido a prescindere dalla calibrazione è che le politiche che hanno un obiettivo pre-fissato in termini di temperature (**T<2,5**) o rapidità di riduzione delle emissioni (**Stern**) non sono in genere quelle più appropriate, perché non raggiungono il giusto equilibrio tra contenimento del riscaldamento globale e mantenimento di adeguati livelli di crescita economica: risultano subottimali perché comportano l'adozione di misure i cui costi marginali eccedono i benefici.

¹⁵⁸La calibrazione della funzione di danno è quella presentata in Nordhaus e Moffat (2017), che si basa su 36 stime presentate in 27 studi. Nordhaus osserva però che la sua calibrazione è basata su studi recenti e che quindi i risultati delle simulazioni possono essere considerati affidabili.

11.2 Gli scenari NGFS

Anche gli scenari del *Network for Greening the Financial System* (NGFS),¹⁵⁹ progettati per rappresentare una gamma di possibili futuri, sono disegnati utilizzando MVI. Con questi scenari si cerca di analizzare il modo in cui le politiche di mitigazione e gli sviluppi tecnologici, interagendo con l'economia, influenzano i rischi fisici¹⁶⁰ e di transizione¹⁶¹ associati ai cambiamenti climatici. Gli scenari NGFS non sono previsioni, ma strumenti per aiutare istituzioni finanziarie e governi ad affrontare una varietà di esiti possibili, con l'obiettivo di identificare vulnerabilità economiche e finanziarie a lungo termine. Le banche centrali in particolare possono utilizzarli per promuovere pratiche di finanza sostenibile e investimenti verdi oppure per sviluppare e implementare politiche di supervisione e regolamentazione che tengano conto dei rischi climatici.

L'Appendice C presenta in forma più analitica le principali caratteristiche degli scenari NGFS.

11.3 Confronto con altri modelli

Per verificare l'affidabilità delle proiezioni del modello DICE, Nordhaus considera i risultati di esercizi analoghi effettuati con oltre una decina di MVI. Le differenze riscontrate risultano in genere modeste e, nei casi in cui sembrano rilevanti, sono attribuibili a un diverso grado di aggiornamento delle stime o a simulazioni non perfettamente omogenee.

Le proiezioni del modello DICE sulla concentrazione di CO_2 nell'atmosfera tendono a essere più basse di quelle ottenute con altri modelli, ma questo dipende dal fatto che incorporano un trend di decarbonizzazione più marcato, in linea con le evidenze più recenti. L'opposto accade invece con le stime dell'aumento della temperatura, che si collocano sulla fascia alta delle proiezioni.

¹⁵⁹Il Network for Greening the Financial System è un'associazione di banche centrali e supervisor finanziari globali, che si impegna a promuovere una finanza sostenibile. Fondato nel 2017, l'obiettivo principale dell'NGFS è quello di rafforzare la risposta del settore finanziario ai rischi climatici e ambientali e di sostenere la transizione verso un'economia sostenibile.

¹⁶⁰I rischi fisici sono quelli derivanti dagli impatti sull'ambiente dei cambiamenti climatici e possono essere suddivisi in due categorie: (1) rischi acuti, dovuti a eventi climatici estremi, quali uragani e inondazioni, che si verificano in un periodo di tempo relativamente breve; (2) rischi cronici, legati ai cambiamenti climatici che si verificano su periodi di tempo più lunghi, quali desertificazione e aumento del livello delle acque.

¹⁶¹I rischi di transizione si riferiscono ai rischi associati al passaggio verso un'economia a basse emissioni di carbonio. Cambiamenti nelle politiche climatiche, nelle tecnologie, nelle preferenze dei consumatori e nei mercati possono modificare la domanda di alcuni prodotti e compromettere le prospettive delle imprese che li producono.

11.4 L'incertezza sul valore dei parametri

Anche se il confronto tra MVI è importante per capire in che misura i risultati degli esercizi di *policy evaluation* dipendono dalla specificazione dei modelli, la maggior fonte di incertezza è dovuta alla difficoltà di calibrare in modo accurato i parametri critici degli MVI:¹⁶² se i coefficienti di un modello possono assumere valori anche molto diversi tra loro, l'affidabilità dei risultati degli esercizi di *policy evaluation* si riduce notevolmente.

Un modo per tener conto di questo tipo di incertezza è quello di associare ai parametri critici non un singolo valore, ma una distribuzione di probabilità, da cui effettuare estrazioni per simulare ripetutamente il modello e generare distribuzioni di probabilità per le variabili endogene. Per quanto attraente, questa soluzione non è semplice da implementare, in quanto gli effetti del riscaldamento globale – in particolare quelli più preoccupanti, i cosiddetti *tail event* – non si sono ancora manifestati e non esistono quindi basi empiriche utilizzabili per ottenere stima econometriche affidabili.

Uno svantaggio di questa procedura è che essa richiede un gran numero di simulazioni; il principale merito è che consente di stimare in modo sufficientemente robusto la probabilità degli eventi di maggior interesse.

In un articolo recente Nordhaus¹⁶³ presenta un'analisi di sensitività su cinque parametri del modello DICE. I parametri sono:

1. il coefficiente del quadrato della temperatura nella funzione di danno (θ_2 nell'equazione (D.4)), la cui distribuzione è ipotizzata essere una normale, con media 0,236 e deviazione standard pari a 0,118. Al valore centrale corrisponde una perdita di PIL pari a poco meno di un quarto di punto percentuale per un aumento della temperatura di 1°C e a due punti percentuali se l'incremento è di 3°C;
2. il tasso di crescita della produttività del lavoro, fissato al 2,1% in media nel periodo 2015-2100 su indicazione di un panel di esperti, che ha inoltre stimato all'1,1% la deviazione standard. Anche in questo caso la distribuzione prescelta è quella gaussiana;
3. il tasso di riduzione dell'intensità carbonica ($\frac{\Delta\sigma_t}{\sigma_{t-1}}$ nell'equazione (D.9)); anche per questa variabile Nordhaus ipotizza una distribuzione normale,

¹⁶²Gillingham e i suoi coautori mostrano che l'incertezza relativa alla corretta specificazione dei modelli è molto meno rilevante di quella attribuibile alla difficoltà di stimare in modo accurato i loro parametri. Cfr. Gillingham *et al.* (2018).

¹⁶³Cfr. Nordhaus (2017).

con media che si riduce progressivamente e deviazione standard pari allo 0,32%, valore derivato confrontando i tassi di crescita di σ_t in sei MVI;¹⁶⁴

4. la sensibilità climatica ($\frac{\eta}{\kappa}$, che si ottiene combinando le equazioni (D.15) e (D.16)); adottando un approccio bayesiano, si ottiene una *posterior distribution* approssimata da una log-normale. Il valore medio della sensibilità climatica è 3,13 e la deviazione standard 0,843;
5. la parte di emissioni trattenuta dai bacini intermedi¹⁶⁵, che contribuisce a determinare la quota di CO_2 che rimane nell'atmosfera.¹⁶⁶

Anziché effettuare simulazioni Monte Carlo, che dovrebbero essere nell'ordine di milioni per garantire risultati affidabili, Nordhaus propone una drastica semplificazione, basata sulla divisione in quintili della distribuzione associata a ciascun parametro di valore incerto: per ciascun quintile viene scelto il valore atteso, ottenendo $5^5 = 3.125$ possibili combinazioni, corrispondenti al numero di simulazioni da effettuare per stimare la densità di probabilità delle variabili d'interesse ed essere in grado di valutare in modo più robusto l'efficacia delle politiche di riduzione delle emissioni.

I valori riportati nella Tavola 4 indicano che solo in alcuni casi e per alcune variabili le simulazioni del modello DICE con la calibrazione preferita¹⁶⁷ forniscono risultati simili a quelli che si ottengono incorporando l'incertezza: l'approssimazione è migliore nello scenario ottimale (perché le politiche di mitigazione tengono conto di quegli stati del mondo in cui i danni causati dal riscaldamento globale sono maggiori o la sensibilità climatica è più elevata) e per variabili come l'aumento della temperatura e la concentrazione di CO_2 .

Un altro risultato interessante dell'esercizio di Nordhaus è che per le variabili geofisiche – aumento della temperatura e concentrazione di biossido di carbonio – l'incertezza è ridotta, grazie ai lunghi ritardi che caratterizzano l'evoluzione del clima e alla relativa precisione con cui sono noti i parametri delle relazioni che legano gas serra e temperatura; per le variabili economiche – PIL, danni e

¹⁶⁴Cfr. Gillingham *et al.* (2018).

¹⁶⁵Con il termine bacini intermedi Nordhaus fa riferimento alla biosfera e alla parte superiore degli oceani.

¹⁶⁶Nordhaus non specifica quale dei parametri presenti nelle equazioni che descrivono la circolazione del carbonio viene utilizzato, ma si limita a dire che la distribuzione associata è una log-normale, la cui deviazione standard è calibrata sulla base dell'impatto che ha sul numero per milione (ppm) di molecole di CO_2 nell'aria.

¹⁶⁷La colonna che contiene i risultati della simulazione DICE con la calibrazione preferita è denominata 'DICE best guess'.

costo sociale del carbonio – la volatilità è invece molto maggiore, soprattutto a causa dell'incertezza sul tasso di crescita del PIL.

Tavola 4 - Statistiche per le variabili più importanti

	media	DICE Best Guess	mediana	deviazione standard	diff. IQ	coefficiente di variazione
Simulazione di base						
Temperatura nel 2100	4,17	4,1	4,08	0,99	1,39	0,24
Concentrazione di CO ₂	926,8	826,6	839,9	307,1	394,7	0,33
Costo Sociale del Carbonio nel 2015	33,6	30,0	24,5	30,6	30,2	0,91
PIL globale nel 2100	1140	759	766	1009	875	0,88
Danni nel 2100 (in % del PIL)	4,1	3,8	3,2	3,3	3,8	0,80
Scenario ottimale						
Temperatura nel 2100	3,49	3,50	3,44	0,71	0,94	0,20
Concentrazione di CO ₂	666,3	633,1	629,4	161,5	170,0	0,24
Costo Sociale del Carbonio	31,7	29,6	24,2	26,7	28,7	0,84
PIL globale	1178	766	772	1054	873	0,89
Danni (in % del PIL)	2,6	2,8	2,4	1,4	2,0	0,54

Fonte: Nordhaus (2018). Per il costo sociale del carbonio l'anno di riferimento è il 2015; per tutte le altre variabili i valori riportati si riferiscono al 2100. Tutte le statistiche si riferiscono alla distribuzione di probabilità generata con le 3125 simulazioni. La differenza interquartilica (diff.IQ) è la differenza tra il terzo e il primo quintile; il coefficiente di variazione è il rapporto tra deviazione standard e media. I valori nella colonna 'DICE best guess' sono quelli ottenuti simulando il modello DICE con i parametri incerti fissati alla media (che coincide con il valore ritenuto più probabile).

11.5 Il Teorema Triste

L'approccio proposto da Nordhaus risponde solo in parte alle critiche di Pindyck,¹⁶⁸ che ritiene che la nostra ignoranza sulle relazioni tra economia e clima sia più radicale.¹⁶⁹ Decidere quale distribuzione di probabilità adottare non è

¹⁶⁸Cfr. Pindyck (2022), cap. 3.

¹⁶⁹Con riferimento alle questioni climatiche, spesso si parla di incertezza knightiana, dal nome dell'economista Frank Knight, che ha introdotto la distinzione tra rischio e incertezza. Mentre con il termine rischio si intende qualcosa di misurabile, ovvero un evento a cui può essere associata una certa probabilità di verificarsi, con incertezza si intende la mancanza di qualsiasi conoscenza quantificabile sugli eventi di interesse. Più di recente ha preso piede l'uso dell'espressione *radical uncertainty*, introdotta da Kay e King, che hanno rimpiazzato la dicotomia knightiana con quella tra *resolvable* (incertezza risolvibile) e *radical uncertainty* (incertezza radicale). Nelle parole dei due autori, "Abbiamo scelto di sostituire la distinzione tra rischio e incertezza introdotta da Knight e Keynes con una distinzione tra incertezza risolvibile e incertezza radicale. L'incertezza risolvibile è quella che può essere eliminata consultando una fonte (sono incerto su quale città sia la capitale della Pennsylvania) oppure che può essere rappresentata da una distribuzione di probabilità nota (il giro della roulette). Con l'incertezza radicale, invece, non esiste un analogo modo di risolvere l'incertezza — semplicemente non lo sappiamo. L'incertezza radicale ha molte dimensioni: oscurità; ignoranza; vaghezza; ambiguità; problemi mal definibili; e una mancanza di informazioni che in alcuni casi, ma non in tutti, potremmo sperare di colmare in futuro. Questi aspetti dell'incertezza costituiscono la materia dell'esperienza quotidiana." Cfr. Kay e King (2020). Un'altra espressione usata spesso con significato analogo a incertezza knightiana e *radical uncertainty* è *deep uncertainty*

più semplice che stimare il valore puntuale di un parametro e comporta valutazioni discrezionali che condizionano i risultati delle simulazioni. Ancora più problematico è il fatto che la forma funzionale di alcune equazioni è essa stessa altamente incerta. Un esempio è la relazione tra concentrazione di CO_2 e aumento della temperatura, che normalmente si dà per scontato sia lineare, mentre non è possibile escludere che possa mutare e cambiare forma nel corso del tempo, per esempio per effetto del raggiungimento di un *tipping point*.

Una critica ancora più radicale è quella di Weitzman,¹⁷⁰ che afferma che l'incertezza relativa all'impatto dei cambiamenti climatici è talmente elevata da rendere impossibile massimizzare l'utilità e quindi applicare l'analisi costi-benefici nella valutazione delle politiche di mitigazione. Secondo Weitzman, se (i) il grado di avversione al rischio è sufficientemente alto e (ii) la probabilità che si verifichino eventi catastrofici non è trascurabile, i danni attesi possono generare perdite di utilità talmente elevate che chiunque sarebbe disposto a pagare anche prezzi elevatissimi pur di assicurarsi contro il verificarsi degli eventi temuti. Nel caso dei rischi climatici, per i quali Weitzman ritiene che entrambe le condizioni siano verificate, questo significa accettare misure draconiane per l'azzeramento delle emissioni. Questo in sintesi è il cosiddetto Teorema Triste (*Dismal Theorem*), che viene da molti visto come un argomento decisivo a favore di politiche climatiche che puntano a ottenere il massimo risultato nel minor tempo possibile, anziché mirare all'azzeramento graduale delle emissioni.

Le reazioni alla tesi di Weitzman sono state immediate e numerose e hanno consentito di metterne in luce i punti deboli. Nordhaus¹⁷¹ ha sottolineato che le condizioni sottostanti al Teorema Triste sono difficili da verificare, perché richiedono code della distribuzione di probabilità estremamente larghe, che generano perdite di PIL e consumi che non hanno riscontro nell'evidenza disponibile. Per arrivare a questa conclusione, Nordhaus considera la storia dei disastri che hanno colpito nell'ultimo secolo quasi 200 paesi¹⁷² e utilizza la contrazione dei consumi verificatasi in ciascun episodio per stimare il parametro di una distribuzione paretiana, che usa per approssimare la probabilità del verificarsi di eventi catastrofici. Sulla base del valore stimato, Nordhaus mostra che solo in presenza di un elevato grado di avversione al rischio si andrebbe incon-

(incertezza profonda), che si trova per esempio in Tol (2019).

¹⁷⁰Cfr. Weitzman (2009).

¹⁷¹Cfr. Nordhaus (2012).

¹⁷²Nordhaus considera due differenti banche dati: la prima copre un secolo e si riferisce a 24 economie relativamente sviluppate; la seconda include 188 paesi e si estende su un orizzonte temporale più breve, che va dal 1950 al 2007.

tro a una perdita attesa indefinitamente grande.¹⁷³ Nel caso generale quindi le conclusioni di Weitzman non sembrerebbero valide.

Nordhaus solleva una seconda critica al Teorema Triste, ovvero che le sue conclusioni presuppongono l'assenza di politiche di mitigazione, che se ben disegnate possono contribuire a precludere o rendere meno probabili gli eventi più catastrofici. Nordhaus illustra la sua tesi con un esempio: in presenza di una sensibilità climatica molto elevata, pari per esempio a 12, raddoppiare la concentrazione di gas serra nell'atmosfera provocherebbe danni incommensurabili, come preconizzato da Weitzman; se però fosse possibile lanciare nella stratosfera particelle di solfato per assorbire radiazioni solari, allora l'aumento delle temperature verrebbe contenuto e le conseguenze più catastrofiche del riscaldamento verrebbero precluse o rese meno probabili. Il Teorema Triste non si applicherebbe quindi a quelle situazioni in cui le politiche di mitigazione risultassero efficaci.

Seppur con argomentazioni diverse, anche Tol¹⁷⁴ mette in dubbio la rilevanza pratica della tesi di Weitzman e usa le sue stesse argomentazioni per dichiarare impraticabili anche politiche draconiane di riduzione dei rischi climatici. Come esempio Tol considera lo stop all'impiego dei combustibili fossili con l'introduzione di una *carbon tax* elevatissima. Le conseguenze di una misura di questo tipo sarebbero terrificanti: non sarebbe più possibile riscaldare la maggior parte delle abitazioni né produrre i fertilizzanti necessari a mantenere adeguati livelli di produzione agricola; il trasporto e la conservazione dei cibi avrebbero costi proibitivi; la purificazione e la distribuzione dell'acqua diverrebbero impraticabili; collapserebbe la produzione di medicine e l'offerta di servizi sanitari. Centinaia di milioni di persone, se non miliardi, morirebbero. È difficile pensare che una politica con queste conseguenze possa essere considerata la risposta ottimale ai cambiamenti climatici.

Secondo Tol, nella tesi di Weitzman c'è anche una intrinseca debolezza logica: se l'utilità attesa non esiste perché non può essere calcolata e se quindi non è possibile considerare la sua massimizzazione come criterio per valutare le

¹⁷³La densità di probabilità di una variabile casuale paretiana x è $f(x) \propto x^{-(g+1)}$, dove $g > 0$: media e varianza esistono e sono finite solo per valori di g superiori a 1. Nel caso in esame, x rappresenta il danno causato dai cambiamenti climatici ed è approssimato dal reciproco del consumo. Per il Teorema Triste quello che rileva non è il danno di per sé, ma l'impatto che esso ha sull'utilità, che si può ipotizzare sia di tipo isoelastico, come la (D.2) del modello DICE: la tesi di Weitzman è confermata se l'integrale della densità di probabilità moltiplicata per la funzione di utilità è infinito, ovvero se si verifica la condizione $g+3-a > 0$, dove a il grado di avversione al rischio (relativo). Cfr. Nordhaus (2009), p.21, e Nordhaus (2012), p. 205.

¹⁷⁴Cfr. Tol (2019), cap. 11.

politiche di mitigazione, allora non è neppure possibile decidere misure alternative senza prima individuare una nuova regola che consenta di confrontarle e scegliere quella preferibile.¹⁷⁵

11.6 Incertezza e politiche climatiche

In che modo l'incertezza incide sulla scelte delle politiche climatiche? Secondo Pindyck¹⁷⁶ esistono due forze che spingono in direzione opposta: da un lato l'incertezza aumenta la convenienza ad assicurarsi contro il verificarsi di eventi negativi e quindi ad adottare politiche più aggressive di contrasto alle emissioni; dall'altro l'irreversibilità dei costi delle politiche di mitigazione spinge a non adottare misure dispendiose che in seguito potrebbero rivelarsi non necessarie.

L'incertezza aumenta la convenienza ad assicurarsi contro i rischi climatici attraverso due canali: la forma funzionale della funzione di danno e l'avversione al rischio. Poiché la funzione di danno è fortemente convessa, se in corrispondenza di un dato livello di concentrazione di CO_2 le temperature aumentano più del previsto, i costi per la società sono maggiori dei benefici che derivano da una sorpresa analoga, ma di segno opposto; se in aggiunta la funzione di benessere sociale è concava e quindi incorpora un certo grado di avversione al rischio, la disutilità derivante dalla convessità della funzione di danno è più elevata. In una situazione di questo tipo la convenienza ad assicurarsi contro il rischio climatico cresce all'aumentare dell'incertezza.

Un fattore che spinge nella direzione opposta, vale a dire a non eccedere nelle misure di contrasto ai cambiamenti climatici, è invece l'irreversibilità dei costi. Ridurre le emissioni di CO_2 può essere estremamente dispendioso, comportando spese che possono ammontare a svariati punti di PIL. Questi costi, una volta sostenuti, non possono più essere recuperati; un esempio sono gli investimenti necessari ad ottenere energia rinnovabile, che comportano la realizzazione di macchinari e capitale fisico, che una volta installati non possono più essere convertiti ad altri usi. Può quindi essere conveniente rimandare gli interventi in attesa di nuove informazioni, che possano rendere più chiari i vantaggi di un'azione decisa e immediata rispetto a interventi più cauti e gradualisti.¹⁷⁷

¹⁷⁵Secondo Tol un criterio alternativo potrebbe essere quello del "minimax", ovvero della minimizzazione della perdita che si realizzerebbe nello stato di natura più sfavorevole, come per esempio nel caso di una sensibilità climatica elevatissima.

¹⁷⁶Cfr. Pindyck (2022), cap. 4.

¹⁷⁷Esistono anche altre ragioni che suggeriscono di non agire affrettatamente: un esempio è costituito dall'innovazione tecnologica, che può consentire la riduzione in futuro dei costi delle politiche di mitigazione.

L'incertezza sulle conseguenze che potranno derivare dal riscaldamento globale rappresenta un incentivo a rimandare le decisioni, perché non si può escludere che i danni possano risultare meno rilevanti di quelli temuti, rendendo i costi sostenuti ingiustificati.¹⁷⁸

Qual è dunque l'impatto dell'incertezza sulle politiche climatiche?

Tol osserva che i danni prodotti dai cambiamenti climatici durano secoli, mentre i costi di politiche eccessivamente prudenti si annullano in pochi decenni; è perciò evidente che la convenienza ad assicurarsi contro eventi potenzialmente catastrofici supera di molto i vantaggi che possono derivare dall'astenersi da investimenti non necessari, per cui è opportuno adottare politiche di riduzione delle emissioni tanto più ambiziose quanto più è elevata l'incertezza.

Conclusioni simili sono tratte da van der Ploeg e Rezai,¹⁷⁹ che dimostrano che in presenza di incertezza introdurre una *carbon tax* rappresenta la scelta migliore, anche se è possibile che la ragione stia dalla parte dei *climate deniers* e che il riscaldamento globale non sia di origine antropica.

Anche altri studi arrivano alle stesse conclusioni. Hassler, Krusell e Olovsson¹⁸⁰ per esempio partono dal presupposto che la *carbon tax* ottimale non possa essere adottata a livello globale, per la difficoltà di arrivare a stime condivise e per le divergenze politiche sulla distribuzione degli oneri; è quindi necessario valutare gli effetti di strategie subottimali, chiedendosi quali siano i costi di introdurre una tassa fissata a un livello sbagliato. Secondo Hassler e i suoi coautori l'errore da evitare è quello di essere troppo ottimisti sulla natura e le conseguenze del riscaldamento globale; errori di segno opposto, se di entità comparabile, comportano costi molto inferiori.

12 Quanto contano le future generazioni?

Quanto pesano le future generazioni nella scelta delle politiche per ridurre le emissioni di gas serra? È giusto attribuire al benessere dei nostri pronipoti un'importanza minore di quella che diamo al nostro?

¹⁷⁸L'irreversibilità può essere utilizzata anche per giustificare l'adozione di misure di segno opposto, visto che le emissioni di biossido di carbonio rimangono nell'atmosfera per periodi lunghissimi, provocando alterazioni permanenti al clima. In questo caso l'irreversibilità può essere vista come una delle ragioni che rendono conveniente assicurarsi contro i danni che possono essere provocati dall'aumento delle temperature.

¹⁷⁹Cfr. van der Ploeg e Rezai (2019).

¹⁸⁰Cfr. Hassler *at al.* (2019).

La risposta a queste domande influenza il modo in cui valutiamo le misure da adottare per favorire la transizione energetica, perché determina il peso attribuito a costi e benefici che si materializzeranno su un orizzonte temporale lungo decenni, se non secoli. Il parametro che più riflette questa scelta è il tasso di sconto della funzione di utilità.¹⁸¹

Sul valore appropriato da assegnare a questo parametro esistono opinioni molto diverse: c'è chi, come Stern,¹⁸² considera opportuno fare affidamento su valori molto prossimi allo zero (0,1%) e chi, come Nordhaus,¹⁸³ ritiene invece che sia necessario utilizzare un tasso di sconto decisamente più elevato, nell'ordine dell'1,5%, per arrivare a un valore ragionevole (oltre il 5%) del rendimento reale del capitale, che è il termine di confronto per valutare gli investimenti necessari alla transizione verde.¹⁸⁴

La posizione di Stern si basa su un presupposto di natura etica, che considera inaccettabile assegnare al benessere delle generazioni future un valore inferiore a quello attribuito alla generazione presente. Solo in un caso questa scelta è giustificata, ovvero se si pensa che vi sia un'elevata probabilità che il mondo possa cessare di esistere:¹⁸⁵ un valore del tasso di sconto annuale pari allo 0,1%, che corrisponde a una probabilità di estinzione di circa il 10% in un secolo, è il massimo che possa essere considerato accettabile.¹⁸⁶

Nordhaus dissente totalmente dalla tesi di Stern, che ritiene poco solida anche dal punto di vista etico. Sulla base della teoria di Rawls sarebbe infatti moralmente preferibile massimizzare il benessere della generazione più povera, che è quella corrente, se si tiene conto dei guadagni di produttività che aumenteranno la ricchezza dei nostri pronipoti; alternativamente, si potrebbe considerare prioritario adottare quei provvedimenti che massimizzano il consumo nel caso in

¹⁸¹Queste considerazioni e quelle che seguono sono trattate in modo molto più dettagliato nel nono capitolo di Nordhaus (2008).

¹⁸²Cfr. Stern (2007). Il Rapporto (*Stern Review*) è stato commissionato dal governo del Regno Unito nel mese di luglio del 2005.

¹⁸³Cfr. Nordhaus (2008).

¹⁸⁴Stime del tasso di sconto non troppo dissimili da quelli di Stern sono presentate in Giglio *et al.* (2021). Gli autori utilizzano dati del mercato immobiliare, i cui prezzi hanno il pregio di riflettere direttamente il rischio climatico, e mostrano che i tassi di sconto appropriati da applicare agli investimenti di mitigazione del cambiamento climatico sono bassi e inferiori al tasso privo di rischio, come in Stern, mentre quelli utilizzati da Nordhaus sono più elevati.

¹⁸⁵In Stern (2007) si legge: "L'argomentazione [...] di molti altri economisti e filosofi che hanno esaminato queste questioni etiche di lungo periodo è che il 'puro sconto temporale' è rilevante solo per tenere conto della possibilità esogena di estinzione."

¹⁸⁶Stern (2007) conclude: "infatti, se ciò fosse vero – e fosse stato vero in passato – sarebbe sorprendente che il genere umano sia durato così a lungo". Sulla base di questa frase risulta quindi sorprendente la scelta di non fissare a zero il tasso di sconto, decisione che però può essere spiegata dalle difficoltà analitiche che essa creerebbe, per esempio la possibilità di non convergenza della funzione di benessere.

cui si verificano gli eventi più nefasti, come carestie o guerre. In tali evenienze, sarebbe socialmente preferibile orientare le politiche dei governi ad accumulare vaccini, provviste e riserve energetiche. In casi come questi sarebbe appropriato adottare un tasso di sconto elevato, anziché nullo. Un difetto ancora più grave della posizione di Stern - ma anche della alternative sopra citate - è che essa comporta che le decisioni prese oggi siano vincolanti anche per le generazioni future, ipotesi irrealistica e *time inconsistent* (incoerente temporalmente).

Uno dei principali risultati degli studi di impostazione economica sui cambiamenti climatici, che normalmente adottano ipotesi analoghe a quelle suggerite da Nordhaus, è che le politiche più efficienti sono quelle che richiedono riduzioni delle emissioni contenute nel breve termine, ma crescenti nel tempo.¹⁸⁷ Adottare un tasso di sconto (pressoché) nullo, anziché uno in grado di replicare la produttività marginale del capitale, ha implicazioni radicalmente diverse per la scelta delle politiche da adottare per affrontare la transizione verde. Se si attribuisce la stessa importanza al benessere della generazione che vive oggi rispetto a quelle dei decenni e secoli futuri, la conclusione a cui si arriva è che la reazione appropriata deve essere immediata e vigorosa, anche se gli effetti negativi dell'aumento delle temperature si materializzeranno tra decenni.¹⁸⁸ Ciò che determina politiche così antitetiche è la diversa valutazione del costo sociale delle emissioni di CO_2 , che con un fattore di sconto come quello suggerito da Stern arriva a essere oltre dieci volte superiore a quello che si ottiene con calibrazioni comunemente accettate.¹⁸⁹

Nordhaus fornisce un semplice esempio per dimostrare i risultati fortemente contro-intuitivi a cui può condurre l'approccio suggerito da Stern. Supponiamo che tra un paio di secoli l'alterazione del clima sia responsabile di danni che comportano una riduzione del consumo annuale dello 0,1% dal 2200 in poi. Secondo la metodologia suggerita da Stern sarebbe conveniente fare immediatamente investimenti che ridurrebbero il consumo mondiale del 56% per rimuovere le cause del danno futuro; in altri termini, un dimezzamento del consumo odierno sarebbe giustificato per evitare una minuscola contrazione della capacità di spesa nel lontano futuro.¹⁹⁰ Risultati simili si otterrebbero se l'evento in que-

¹⁸⁷Nordhaus (2008) sottolinea che questo risultato rimane valido anche se si cambia il modello, gli obiettivi climatici o la specificazione delle equazioni che descrivono la concentrazione di CO_2 e l'aumento delle temperature.

¹⁸⁸In Stern (2007) si afferma: "Considerando insieme questi [...] fattori, il costo del cambiamento climatico aumenterebbe probabilmente fino all'equivalente di una riduzione del 20% dei consumi pro capite, ora e per sempre."

¹⁸⁹Nordhaus ottiene queste stime utilizzando la versione 2007 del suo modello DICE.

¹⁹⁰I risultati dell'esempio citato sono ottenuti con un modello di crescita à la Ramsey, in cui

stione, anziché essere certo, avesse una bassa probabilità di verificarsi, pari al 10%: in questo caso il costo dell'intervento sarebbe minore, comportando una contrazione del consumo dell'8%, ma sarebbe comunque difficile da giustificare, perché sostenuto per evitare le conseguenze di un evento lontano nel tempo, di modesta portata e con bassa probabilità di verificarsi.¹⁹¹

Dubbi sull'affidabilità dei risultati e delle politiche suggerite da Stern sono espressi anche da Tol e Yohe (2009), che ne sottolineano la stretta dipendenza dalle ipotesi adottate sul tasso di sconto, il grado di avversione al rischio, l'orizzonte temporale e la vulnerabilità/capacità di adattamento delle diverse aree geografiche. Sulla base di una batteria di analisi di sensitività, i due autori mostrano che molto spesso i valori dei parametri scelti da Stern sono quelli che massimizzano la stima dei danni causati dall'aumento delle temperature; scegliendo una combinazione di parametri diversi, ma altrettanto plausibili, la stima dei danni può ridursi anche dell'84%. Errori di segno opposto si ottengono allungando l'orizzonte temporale, con la stima dei danni che può essere superiore anche del 900%; questa però è una conseguenza pressoché inevitabile di adottare un tasso di sconto prossimo allo zero. Secondo Tol e Yohe una tale variabilità di risultati dovrebbe essere chiaramente comunicata e suggerire una notevole cautela nella formulazione di politiche di mitigazione e adattamento, che altrimenti potrebbero risultare fuorvianti se non dannose.¹⁹²

13 Critiche all'uso degli MVI

Nonostante il grado di accuratezza raggiunto, i modelli di valutazione integrata sono oggetto di critiche, a volte anche aspre. Il dissenso riguarda in particolare

il tasso di rendimento reale, che coincide con la produttività marginale del capitale, dipende non solo dal tasso di sconto, ma anche dal tasso di crescita dell'economia e dalla curvatura della funzione di utilità. Nel caso di una funzione di utilità isoelastica, il tasso di interesse reale di equilibrio è pari a $r^* = \delta + \sigma g$, dove δ è il tasso di sconto, g misura il ritmo di crescita dell'economia e σ è l'inverso dell'elasticità di sostituzione intertemporale. Risultati contro-intuitivi come quelli dell'esempio di Nordhaus potrebbero essere evitati se a un tasso di sconto basso o nullo corrispondesse una elasticità di sostituzione intertemporale anch'essa estremamente bassa. Non è però questa una caratteristica della parametrizzazione dei modelli usati nel Rapporto Stern.

¹⁹¹Nordhaus osserva che le implicazioni di affidarsi a un tasso di sconto nullo sarebbero ancora più drammatiche se riferite per esempio alle politiche di difesa: una nazione potrebbe dichiarare una guerra oggi per evitare che il proprio avversario raggiunga la superiorità nella dotazione di armi nucleari tra un secolo.

¹⁹²Nelle conclusioni di Tol e Yohe (2009) si legge: "Decisioni di qualità si baseranno su informazioni di qualità, derivanti da analisi trasparenti che producono stime le cui sensibilità sono chiaramente comprese. Il nostro lavoro suggerisce che la Stern Review non abbia ancora raggiunto questo standard."

tre aspetti. Innanzitutto, alcuni dei parametri fondamentali degli MVI non possono essere stimati in modo affidabile e devono essere calibrati facendo ricorso a valutazioni soggettive. In secondo luogo, l'innovazione tecnologica, fattore vitale per la valutazione dei costi e delle opzioni disponibili per affrontare i cambiamenti climatici, è trattata in modo approssimativo. Infine, le politiche ambientali, la cui attuazione comporta costi e solleva resistenze, sono considerate dati esogeni, privi di qualsiasi valenza politica, e confinate in una dimensione essenzialmente nazionale, a fronte della natura globale dei cambiamenti climatici. Questi limiti sono riconosciuti dai loro stessi utilizzatori, che li ritengono in parte inevitabili, riflesso della limitata conoscenza dell'interazione tra variabili economiche e fattori climatici, e in parte superabili, con un uso appropriato dell'analisi di sensitività.

Critiche più radicali sono invece quelle espresse da Pindyck,¹⁹³ che ritiene gli MVI uno strumento pericoloso, perché creano una percezione di conoscenza e precisione che è illusoria e può indurre ad attribuire alle loro previsioni una legittimità scientifica che non hanno. Il problema si pone in particolare per la stima del costo sociale del carbonio, che determina in che misura le fonti di energia fossile debbano essere tassate per prevenire emissioni di CO_2 incompatibili con il contenimento dell'aumento delle temperature. Pindyck evidenzia in particolare quattro carenze fondamentali:

- i modelli di valutazione integrata utilizzano funzioni e parametri le cui forme e valori sono fissati in modo arbitrario, generando risultati inattendibili. Un esempio è rappresentato dal tasso di sconto, che, a secondo venga scelto prossimo allo zero e dell'ordine di qualche punto percentuale, porta a stime dell'SCC che vanno da poco più di 10 dollari a oltre 200 per tonnellata;
- la risposta della temperatura al raddoppio della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera (vale a dire la "*climate sensitivity*") dipende da numerosi effetti di retroazione ed è sostanzialmente inconoscibile, ma è un ingrediente fondamentale delle previsioni degli MVI;
- la specificazione della relazione tra l'aumento della temperatura e il prodotto interno lordo, misurata dalla cosiddetta funzione di danno ("*damage function*" nella terminologia internazionale), si basa su una scarsissima

¹⁹³Cfr. per esempio Pindyck (2013) e Pindyck (2017).

evidenza empirica, che si riferisce a periodi di tempo ridotti e a variazioni di temperatura modeste;

- gli MVI non sono di nessuna utilità per quantificare l'impatto di eventi estremi, come per esempio incrementi della temperatura superiori ai 5°C, che sono però quelli più rilevanti per la scelta delle politiche di riduzione del rischio.

Secondo Pindyck, l'ignoranza del valore di parametri fondamentali non può essere superata con artifici tecnici, per esempio specificando una distribuzione di probabilità per ciascuno di essi e poi effettuando simulazioni Monte Carlo, perché neppure la loro distribuzione è nota e ipotesi differenti possono generare risultati radicalmente diversi. I modelli di valutazione integrata sono quindi uno strumento pericoloso se utilizzato per valutare le politiche necessarie a limitare l'aumento delle temperature: un'alternativa più affidabile è quella di fare ricorso al giudizio degli esperti, che possono fornire, in modo trasparente e senza bisogno di modelli complicati, le due quantità necessarie a stimare il costo sociale del carbonio, ovvero (i) il costo in termini di PIL di eventi estremi che si possono verificare e (ii) la riduzione di emissioni di biossido di carbonio necessaria ad evitare che essi si verifichino.

Per Pindyck invece un uso corretto degli MVI è quello di usarli come strumento pedagogico, che consente di spiegare in termini non troppo specialistici i rischi che inevitabilmente si corrono proseguendo con emissioni incontrollate di gas serra.

Una parziale risposta alle critiche di Pindyck è fornita da Auffhammer (2018), che sottolinea che anche il parere di una *task force* di esperti è condizionato dalla carenza di informazioni, in particolare sui costi di eventuali eventi catastrofici. Secondo Auffhammer la letteratura empirica più recente ha fatto significativi passi in avanti nella stima della funzione di danno, stima che è lecito pensare costituirebbe il punto di partenza anche delle valutazioni di un *team* di esperti. Inoltre, per la calibrazione degli MVI a volte viene adottato proprio il principio suggerito da Pindyck, ovvero affidarsi al giudizio degli esperti.¹⁹⁴

La replica di Hassler e Krusell (2018) è invece più generale e non si limita a controbattere affermazioni puntuali di Pindyck. Secondo i due economisti gli MVI sono uno strumento flessibile che consente di incorporare le conoscen-

¹⁹⁴Per i modelli DICE e RICE Nordhaus ha raccolto il parere di esperti sia sui danni che possono essere causati da variazioni del clima di intensità tale da provocare effetti catastrofici sia sulla probabilità che essi si verifichino. Cfr. Nordhaus(1994).

ze scientifiche più avanzate e la cui funzione principale è quella di tradurre in termini quantitativi i legami tra attività economica e clima, consentendo la valutazione dell'impatto di politiche alternative di mitigazione e adattamento. Se la calibrazione prescelta fornisce risultati poco convincenti, può essere modificata, verificando se la risposta delle variabili del modello è coerente con i principali fatti stilizzati e se determina risultati plausibili; il tasso di sconto, a cui fa riferimento Pindyck, può essere fissato indifferentemente al valore proposto da Stern o a quello più realistico suggerito da Nordhaus. Non c'è nulla negli MVI che porti automaticamente a sconsigliare politiche che richiedono un'azione immediata e vigorosa per l'abbattimento delle emissioni. Al contrario, poiché le conseguenze dell'azione o inazione dipendono da numerosi elementi (tra cui il progresso tecnico, la dinamica della popolazione e la sostituibilità tra fonti di energia), strategie climatiche alternative possono essere valutate solo all'interno di modelli come gli MVI, che incorporano un gran numero di questi fattori. Infine, Hassler e Krusell sottolineano che il merito principale degli MVI è quello di rendere esplicite le ipotesi sottostanti gli scenari prefigurati, garantendo quindi la trasparenza delle analisi di *policy* e l'affidabilità dei risultati.

14 Conclusioni

Questo lavoro è una rassegna della letteratura che si occupa dei modelli di valutazione integrata e studia come limitare gli effetti sul clima dell'attività umana.

A partire dalla rivoluzione industriale sono state immesse nell'atmosfera quantità crescenti di gas serra, che hanno provocato il progressivo aumento delle temperature. Le emissioni sono il risultato dell'uso di combustibili fossili nell'attività produttiva e nel consumo. Poiché i gas serra permangono nell'atmosfera per periodi anche superiori al millennio, è indispensabile adottare politiche che consentano di ridurre, e possibilmente azzerare, le emissioni inquinanti. Per essere in grado di selezionare misure di mitigazione efficaci, è necessario disporre di strumenti quantitativi in grado di tener conto dell'interazione tra economia e clima: una politica ottimale dovrebbe infatti essere in grado di bilanciare i benefici marginali che derivano dalla riduzione del danno causato dal riscaldamento globale e i costi marginali che riflettono i vincoli all'uso di fonti energetiche inquinanti.

I modelli di valutazione integrata, che sono stati creati con questo obietti-

vo, aggiungono alle equazioni che modellano le relazioni tra aggregati economici quelle che descrivono (i) la circolazione del carbonio, (ii) il legame tra concentrazione di CO_2 e temperatura e (iii) i danni arrecati dal riscaldamento dell'atmosfera. In questo modo viene resa esplicita e operativa la relazione bidirezionale tra economia e clima: la prima influenza il secondo con le emissioni di gas serra; il clima condiziona l'attività economica (e l'utilità che la società deriva dal consumo) con i danni provocati dall'aumento delle temperature. Solo modelli che tengono conto di questa interazione sono in grado di quantificare anche i costi delle strategie di mitigazione.

Oltre a presentare la struttura di base degli MVI, il lavoro descrive in dettaglio i modelli DICE e RICE del premio Nobel Nordhaus, che possono essere considerati i capostipite della famiglia. Vengono poi presentati i risultati degli esercizi di *policy evaluation* effettuati con una pluralità di modelli nonché i tentativi di incorporare nelle simulazioni l'incertezza che circonda il valore dei parametri e rende dubbia la specificazione di alcune equazioni.

Gli MVI sono stati sviluppati per contribuire a capire cosa serve per rimuovere le cause antropiche dei cambiamenti climatici e per selezionare gli obiettivi che è conveniente prefiggersi; consentono di valutare quali risultati sono conseguibili e quali invece impongono costi economicamente insostenibili; permettono di evidenziare incoerenze e costi di scelte che a prima vista sembrerebbero eticamente preferibili. Alcuni di questi risultati, ampiamente discussi in letteratura, sono riportati in questo lavoro.

Il primo e forse più rilevante risultato è che la *carbon tax* ottima, ovvero quella che consente di eliminare l'esternalità climatica, sarebbe di entità sopportabile e non precluderebbe drasticamente le prospettive di crescita dell'economia globale; valori più elevati di quelli ottimali permetterebbero di conseguire più rapidamente l'azzeramento delle emissioni, ma al costo di un forte rallentamento della dinamica del PIL e del benessere.

Un altro risultato rilevante è che solo le politiche che incidono sul prezzo delle fonti di energia fossile sono in grado di contenere, e potenzialmente azzerare, le emissioni di gas serra; se farlo con una *carbon tax* o con un mercato per lo scambio dei diritti di emissione è questione marginale: quello che conta è rendere conveniente sviluppare fonti di energia verde alternative allo sfruttamento dei combustibili fossili. Il contributo che invece può essere fornito dalla politica monetaria risulta modesto; in caso di interventi mal disegnati, può anche produrre effetti opposti a quelli desiderati.

Un altro importante insegnamento degli MVI è che le politiche che si pre-

figgono un tetto all'aumento della temperatura o una data entro cui arrivare all'azzeramento delle emissioni sono inevitabilmente sub-ottimali, perché non tengono adeguatamente conto dei costi che misure troppo ambiziose – oppure troppo blande – impongono alla collettività. Anche considerando l'incertezza che circonda l'interazione tra clima e attività umana, che secondo alcuni renderebbe impossibile applicare l'analisi costi-benefici alla valutazione delle politiche di mitigazione, c'è ragione di dubitare che obiettivi fissati in modo aprioristico possano contribuire in modo efficace alla soluzione del problema dei cambiamenti climatici.

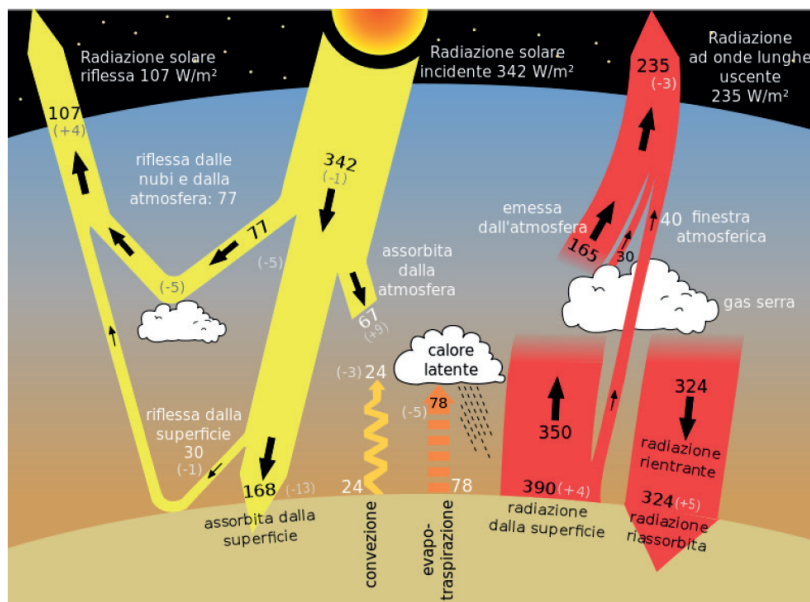
Volendo tirare le somme, si può forse dire che il pregio più grande dei modelli di valutazione integrata è, con tutta probabilità, quello di contribuire a indirizzare su un piano analitico-quantitativo la discussione sulle strategie migliori per combattere i cambiamenti climatici.

15 Appendici

Appendice A: Effetto serra e il bilancio energetico

I raggi solari che colpiscono la Terra vengono in larga misura assorbiti dall'atmosfera e dalla superficie terrestre; la parte restante viene ridiretta verso l'esterno dalle superfici con un elevato potere riflettente. I gas a effetto serra presenti nell'atmosfera – come l'anidride carbonica, il metano, il vapore acqueo – ne trattengono una parte, reindirizzandola verso la Terra e generando una quantità addizionale di calore. I gas serra non costituiscono una barriera per la luce solare in ingresso, ma trattengono invece le radiazioni infrarosse in uscita, provocando un'alterazione del bilancio energetico della Terra, che viene ripristinato solo con il surriscaldamento dell'atmosfera, che aumenta le emissioni di energia verso lo spazio (cfr. Fig. A.1).

Fig. A.1: Bilancio energetico terrestre ed effetto serra



Fonte: NASA, Earth Observation System. Traduzione italiana tratta da Wikipedia.

Grazie a questi gas la temperatura sulla Terra aumenta e diventa ben superiore a quella che si avrebbe in loro assenza. La temperatura rimane stabile fintanto che la quantità di energia proveniente dal Sole è pari a quella irradiata dalla Terra sotto forma di raggi infrarossi, ma questa situazione di equilibrio può

modificarsi in seguito a fenomeni naturali o all'azione dell'uomo: tra i primi vi è la variazione nella quantità di energia che arriva sulla Terra a causa di modifiche nell'orbita del nostro pianeta attorno al Sole, che è tra le principali cause dell'alternanza tra periodi glaciali e temperati; tra le seconde rilevano soprattutto le emissioni di gas serra, dovute alla combustione di materiale fossile per finalità produttive o di consumo. A partire dalla rivoluzione industriale l'uomo ha immesso nell'atmosfera quantità via via crescenti di biossido di carbonio (CO_2), aumentando la concentrazione dei gas serra e trattenendo in questo modo una parte crescente dell'energia riflessa dalla Terra.¹⁹⁵

A causa della presenza di gas serra, l'altezza da cui le radiazioni infrarosse si disperdono nello spazio non è quella della superficie terrestre: attualmente il livello effettivo di irradiazione ("*effective radiating level*") è compreso tra i 5,5 e 6 km di altezza e sale di 1 km in corrispondenza di incrementi di 6°C della temperatura della parte inferiore dell'atmosfera.¹⁹⁶

Il biossido di carbonio è il gas serra che più contribuisce ai cambiamenti climatici,¹⁹⁷ seguito dal metano e dal protossido di azoto; importante è anche l'apporto dell'ozono, presente soprattutto nella parte bassa dell'atmosfera (la cosiddetta *ozonofera*) a circa 25km di altezza, che solo indirettamente è il prodotto di emissioni legate al consumo o all'attività produttiva. Il vapore acqueo, ovvero l'acqua allo stato di vapore, è il gas serra più presente nell'atmosfera: la sua concentrazione dipende solo marginalmente dell'attività umana e risente in particolare della combustione del metano (CH_4), che, combinandosi con le molecole di ossigeno, genera anidride carbonica e acqua allo stato gassoso.¹⁹⁸ L'effetto riscaldante dei gas serra prodotti dalle attività umane sarebbe stato ancora maggiore¹⁹⁹ se non fosse stato contrastato dalle emissioni di

¹⁹⁵Secondo l'IPCC (2021) tutto il riscaldamento osservato dall'era preindustriale (1,1°C) è attribuibile alle attività umane.

¹⁹⁶Le molecole di gas serra assorbono l'energia emessa dalla terra sotto forma di raggi infrarossi; in questo modo si riscaldano e irradiano energia in tutte le direzioni. La parte indirizzata verso l'alto viene a sua volta catturata da altre molecole di gas serra e il ciclo riprende, anche se con minore vigore, perché i gas serra si diradano nei livelli superiori dell'atmosfera: ad una certa altezza sono talmente rarefatti da non essere più in grado di trattenere i raggi infrarossi. Il livello effettivo di irradiazione, vale a dire l'altitudine a cui i raggi infrarossi tendono a disperdersi nello spazio, aumenta al crescere della concentrazione di gas serra nell'atmosfera: quando più alto è il livello effettivo di irradiazione tanto maggiore è la quantità di calore trattenuta nell'atmosfera.

¹⁹⁷Secondo Archer *et al.* (2009) un quarto delle emissioni di biossido di carbonio restano nell'atmosfera per oltre un millennio.

¹⁹⁸Vapore acqueo è prodotto anche dalle scie di condensazione che si formano al passaggio degli aerei. Il contributo al riscaldamento globale di questa fonte di gas serra è comunque sostanzialmente irrilevante.

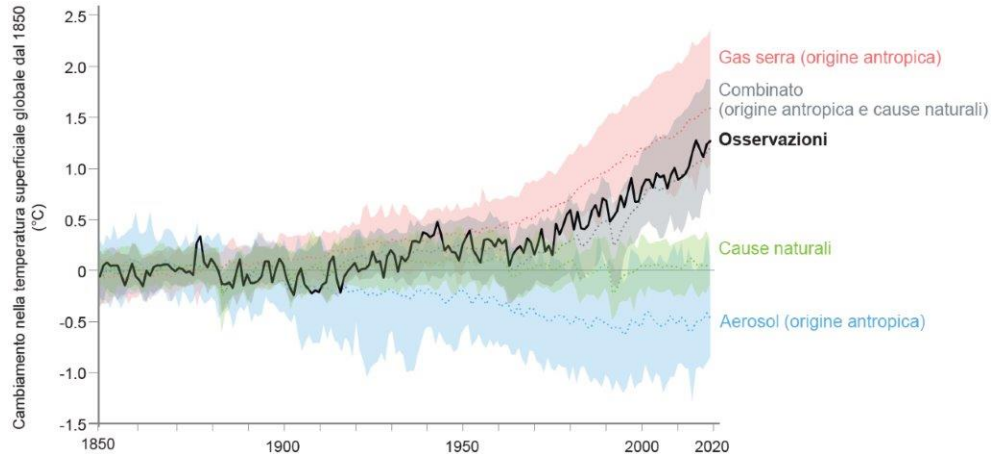
¹⁹⁹Secondo l'IPCC (2021) senza l'attenuazione garantita da aerosol e polveri sottili le temperature sarebbero aumentate all'incirca di altri 0,5°C in media rispetto all'era

inquinanti atmosferici, chiamati aerosol o polveri sottili, che hanno un effetto "raffreddante" sul clima.

Anche i fenomeni naturali, oltre ai fattori antropici, sono in grado di influenzare il clima: l'attività vulcanica per esempio può avere sul bilancio energetico un impatto rilevante. Le grandi eruzioni immettono nell'atmosfera enormi quantità di cenere vulcanica, che possono bloccare la luce solare e abbassare le temperature nelle aree vicine; questi effetti sono però di breve durata, perché la cenere si deposita a terra relativamente in fretta. Più a lungo termine sono invece le conseguenze delle emissioni di diossido di zolfo, che si combinano con il vapore acqueo formando aerosol solfati, che vengono poi dispersi dai venti nell'atmosfera: questi aerosol riflettono la luce solare nello spazio, riducendo l'energia che raggiunge la superficie terrestre e abbassando la temperatura globale per mesi o anni. Altri esempi sono le variazioni cicliche dell'attività solare e le modifiche dell'asse di inclinazione e dell'orbita della Terra intorno al Sole.

L'ipotesi che cause naturali siano responsabili del riscaldamento globale degli ultimi due secoli è però implausibile. I fattori non antropici in grado di influenzare la temperatura su scale temporali brevi (da anni a decenni) non hanno agito in modo significativo dall'era preindustriale a oggi e questa è anche l'indicazione che si ottiene da tutti i modelli di simulazione climatica.

Fig. A.2: Cause antropiche e naturali dell'aumento della temperatura



Fonte: IPCC (2021).

La Fig. A.2 mostra l'andamento della temperatura superficiale globale nel periodo che va dal 1850 al 2019 (linea nera) e il contributo delle componenti preindustriale.

antropica – originata dalle emissioni di gas serra (linea rossa) e di inquinanti atmosferici (linea azzurra) – e di quella naturale (linea verde); le aree tratteggiate sono gli intervalli di confidenza. La scomposizione, che è ottenuta attraverso simulazioni effettuate con modelli climatici, indica chiaramente che la probabilità che l'aumento della temperatura osservato nel periodo sia attribuibile a fattori naturali è estremamente bassa.

Come si vede dal grafico, gli intervalli di confidenza sono ampi, a riprova del fatto che l'incertezza che circonda queste valutazioni è alquanto elevata. Mentre il ruolo dei gas serra – il biossido di carbonio in particolare – nell'alterare l'equilibrio energetico della Terra è noto, più difficile è valutare l'impatto dei fattori naturali e gli effetti dei meccanismi di retroazione che contribuiscono a modificare le temperature. Per esempio è incerto il contributo delle nubi, che se da un lato forniscono uno schermo ai raggi solari, come evidente in una giornata estiva, dall'altro trattengono il calore emesso dalla Terra, fenomeno più facilmente percepibile in una notte invernale.

Poco noto è anche il processo con cui il calore viene assorbito dagli oceani: il riscaldamento dell'atmosfera si trasmette alle acque – prima alla parte superiore e poi agli strati inferiori – a una velocità che dipende per esempio dalle correnti ed è difficile da stimare, per la difficoltà di effettuare misurazioni nelle profondità degli oceani.

A causa della curvatura terrestre le radiazioni solari influenzano il clima in modo non uniforme nelle diverse regioni del pianeta. Gli effetti sulla temperatura dipendono dalla latitudine: sono più forti vicino all'equatore e più deboli in prossimità dei poli, dove è minore l'energia che raggiunge una data superficie e maggiore la quota di radiazioni che viene riflessa, grazie alla presenza di vaste distese di ghiaccio e neve. L'inclinazione dell'asse di rotazione della Terra, inoltre, impedisce che le regioni polari vedano la luce del Sole durante l'inverno. L'insieme di questi fattori fa sì che ai tropici la quantità di luce solare assorbita superi la quantità di calore riemessa, con conseguente aumento netto di calore; il contrario avviene alle alte latitudini (cfr. Fig. A.3).

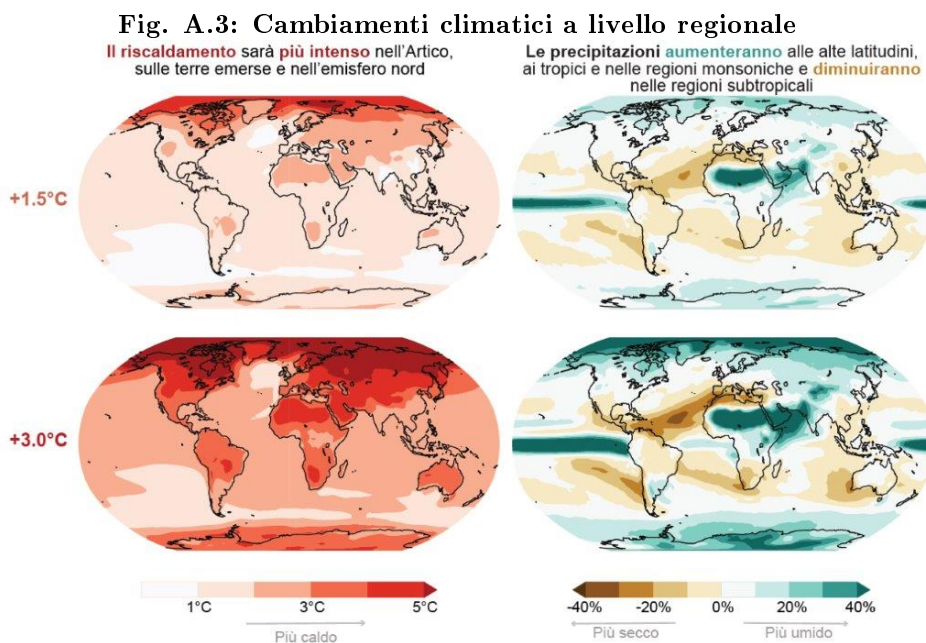
Questi squilibri attivano una serie di meccanismi riequilibratori nell'atmosfera e nell'oceano, che spostano il calore in eccesso dai tropici verso i poli.²⁰⁰

Gli effetti del riscaldamento globale si manifestano con velocità e intensità differenti nella varie parti del mondo. C'è abbondante evidenza che l'aumento delle temperature sarà dalle due alle quattro volte maggiore in prossimità del-

²⁰⁰Questi meccanismi riequilibratori includono l'evaporazione dell'acqua di superficie, la convezione, le precipitazioni, i venti e la circolazione oceanica.

l'Artico (cfr. Fig. A.3), in conseguenza del maggior assorbimento di radiazioni solari, a causa della riduzione delle superfici coperte da ghiacci e nevi e della conseguente diminuzione della frazione di luce riflessa; molto minore sarà invece il riscaldamento della regione antartica.²⁰¹

L'aumento delle temperature sarà generalmente più elevato sulla terraferma che negli oceani e nell'emisfero settentrionale rispetto a quello meridionale, anche perché nel primo la superficie coperta dalla terraferma è più estesa che nel secondo.



Fonte: IPCC (2021).

La risposta non uniforme delle regioni della Terra al riscaldamento globale non dipende in modo rilevante dalla rapidità e dall'intensità dell'aumento della temperatura, ma maggiore è il riscaldamento, più rilevanti sono gli effetti sulle precipitazioni atmosferiche.

²⁰¹Secondo Armour, l'impatto limitato del riscaldamento globale sulla regione antartica dipende da una particolare circolazione delle masse d'acqua. I venti che spirano intorno all'Antartide sollevano l'acqua fredda dalle profondità e spingono le acque superficiali, relativamente calde, verso l'equatore: in questo modo il calore viene portato lontano dall'Antartide, in direzione nord. Nell'Oceano Atlantico, il flusso verso nord delle masse d'acqua superficiali prosegue verso l'Artide. Anche per questo l'Oceano Artico sta subendo fortemente gli effetti del riscaldamento globale, mentre il continente antartico sembra esserne esente. Gli oceani agiscono amplificando il riscaldamento dell'Artide mentre lo rallentano intorno all'Antartide. Cfr. Armour (2016).

Come indicato nella parte destra della Fig. A.3, le precipitazioni aumenteranno in entrambi gli emisferi in prossimità dei poli, al di sopra dei tropici e nelle regioni monsoniche, mentre diminuiranno nel Mediterraneo, nell'Africa meridionale e in alcune aree dell'Australia e dell'America centro-meridionale. Alcune regioni del Mediterraneo e dell'Africa Meridionale diventeranno ancora più aride e calde.

Inoltre, con l'aumentare delle temperature è più probabile che eventi meteorologici estremi si verifichino simultaneamente, peggiorando il loro impatto complessivo: ondate di calore e siccità potrebbero verificarsi contemporaneamente o a breve distanza l'una dall'altra.

Appendice B: Le politiche dell'Unione europea

L'Unione europea si prefigge di arrivare alla neutralità climatica entro il 2050; un traguardo intermedio è fissato per il 2030, dove si mira a ridurre le emissioni di biossido di carbonio del 55% rispetto al livello del 1990. Il modo per conseguire questi obiettivi è indicato nel pacchetto di riforme denominato "Pronti per il 55%" (*Fit for 55* nella dizione ufficiale dell'Unione europea), presentato dalla Commissione europea nel 2021. La strategia per arrivare all'azzeramento delle emissioni si basa principalmente sulla vendita di diritti di emissione e prevede:

- la progressiva riduzione del numero di diritti di emissione concessi annualmente;
- l'estensione del sistema dei permessi a nuovi settori produttivi;
- l'applicazione di un meccanismo di adeguamento del carbonio alle frontiere (CBAM, *Carbon Border Adjustment Mechanism*);
- riforestazione ed uso del suolo per la rimozione di CO₂ dall'atmosfera;
- la creazione di un nuovo sistema di permessi per il riscaldamento nei luoghi di lavoro e i trasporti via terra;
- il divieto della vendita di nuove automobili con motore a benzina, diesel o ibrido a partire dal 2035.

Il sistema di scambio dei diritti di emissione²⁰² è nato nel 2005 e attualmente coinvolge circa 15.000 imprese, che operano nel trasporto aereo e marittimo oppure producono acciaio, cemento o energia. Le emissioni vengono monitorate tramite dei "permessi", che le imprese europee possono scambiarsi tra loro: chi inquina meno può vendere le quote di emissioni a chi inquina di più e viceversa, con l'unico vincolo di non superare complessivamente i limiti imposti dal piano. Una quota dei diritti di emissione – poco più del 40% – è distribuita gratuitamente, mentre la parte restante è messa all'asta e poi scambiata sul mercato; il possesso di un diritto concede la possibilità di emettere una tonnellata di gas serra. Il sistema copre circa la metà della CO₂ e i $\frac{2}{5}$ dei gas serra riversati nell'atmosfera nell'Unione europea.

La quantità di diritti assegnati annualmente decresce progressivamente, per consentire l'azzeramento delle emissioni entro la data desiderata. La rapidità

²⁰²Il sistema di scambio dei diritti di emissione dell'Unione europea è denominato *European Union Emissions Trading System*, abbreviato con la sigla EU ETS1.

della riduzione è aumentata con le riforme del 2009 e 2018 ed è stata ulteriormente rafforzata con il pacchetto *Fit for 55*, le cui prescrizioni però non vanno oltre il 2030: se il ritmo di riduzione proseguisse invariato anche negli anni successivi, a partire dal 2040 non verrebbero più assegnati diritti di emissione. Il programma prevede anche l'interruzione della distribuzione di permessi a titolo gratuito, per garantire ai governi più risorse per compensare i soggetti maggiormente colpiti dalla transizione energetica.

Il secondo pilastro del pacchetto *Fit for 55* (identificato con la sigla EU ETS2) prevede l'estensione del sistema di scambio di diritti di emissione a settori come l'aviazione internazionale e il trasporto marittimo; inoltre, a partire dal 2027 e fino al 2042, contempla la messa in asta di nuovi permessi, destinati all'edilizia non residenziale e al trasporto su strada. Solo l'agricoltura resterà fuori dalle misure decise dall'Unione europea per arrivare alla neutralità climatica, in quanto le emissioni del settore riguardano prevalentemente metano e protossido di azoto, gas serra che non rimangono a lungo nell'atmosfera.

Il pacchetto di riforme *Fit for 55* include anche un meccanismo di adeguamento della tassazione del carbonio alle frontiere (*Carbon Border Adjustment Mechanism*, abbreviato in CBAM). I CBAM hanno l'obiettivo di frenare lo spostamento di attività economiche ad alte emissioni dai Paesi o dalle aree economiche con politiche climatiche relativamente rigide verso quelli con politiche più permissive, obiettivo che si cerca di raggiungere applicando ai prezzi delle importazioni correttivi basati sul loro contenuto di carbonio.

Il terzo pilastro del programma di neutralità climatica si occupa di autoveicoli alimentati da combustibili fossili, a cui è attribuibile il 15% delle emissioni totali di biossido di carbonio dell'Unione europea. Le nuove norme si prefiggono l'obiettivo di azzerare entro il 2035 le emissioni di CO_2 delle autovetture e dei furgoni di nuova immatricolazione.

La decisione dell'Unione europea di adottare misure che consentono un controllo diretto delle emissioni facilita il conseguimento della neutralità climatica ed è una soluzione politicamente più praticabile dell'imposizione di una tassa; il suo punto debole è che implica valori della *carbon tax* volatili e potenzialmente insostenibili se il sentiero di riduzione dei permessi è eccessivamente ambizioso.

Poiché i due sistemi EU ETS1 ed EU ETS2 coprono pressoché per intero le attività responsabili di emissioni, è immediato calcolare la quantità di gas serra che verrà immessa nell'atmosfera dal 2020 in poi nei paesi dell'Unione europea.

Secondo stime recenti,²⁰³ le sue politiche di azzeramento delle emissioni limiterebbero il contributo alla concentrazione di CO_2 a 34 miliardi di tonnellate (34 $GtCO_2$); se tutti gli altri paesi adottassero la stessa strategia, le emissioni complessive si fermerebbero a 600 $GtCO_2$, corrispondenti a un aumento delle temperature di circa 1,5°C, quindi ben al di sotto dei 2°C richiesti dall'Accordo di Parigi del 2015.²⁰⁴

Gli Stati Uniti, con l' *Inflation Reduction Act*, hanno seguito una strada diversa, mirando ad aumentare l'offerta di energia verde e a ridurre il prezzo. Le misure adottate sono state essenzialmente tre: (i) l'erogazione di ingenti sussidi alla produzione, trasmissione e stoccaggio di energia non fossile; (ii) il potenziamento delle infrastrutture verdi;²⁰⁵ (iii) il rafforzamento degli investimenti volti a rendere più efficiente l'uso dell'energia.²⁰⁶

Secondo Hassler e i suoi coautori la strategia americana non è ottimale, perché i sussidi all'energia verde da soli non sono in grado di portare all'azzeramento dell'uso dei combustibili fossili, rendendo inevitabile il ricorso a qualche forma di regolamentazione. Se si scartano le opzioni basate sugli scambi dei diritti di emissione o su una *carbon tax*, l'alternativa che resta è solo il controllo diretto, che è più complicato da implementare e meno efficiente: non tutti i settori dell'economia possono fare a meno dell'energia ottenuta da fonti fossili con la stessa rapidità, ma mentre un sistema come l'EU ETS, che sfrutta meccanismi di mercato, consente di allocare i diritti di emissione laddove sono necessari, i controlli diretti sono difficilmente in grado di valutare in modo accurato le diverse esigenze dei settori dell'economia.

²⁰³Cfr. Hassler, Krusell e Olovsson (2024).

²⁰⁴Cfr. Hassler, Krusell e Olovsson (2024), pag. 32.

²⁰⁵Con il termine infrastrutture verdi si indica la rete di aree naturali e seminaturali presenti sul territorio e in grado di fornire molteplici benefici ambientali e sociali; la loro realizzazione può contribuire in modo significativo a una miglior gestione del rischio di catastrofi e a favorire la tutela della biodiversità e l'uso sostenibile del suolo. Verde pubblico, alberi monumentali e aree naturali protette sono alcune delle componenti dell'infrastruttura verde urbana e peri-urbana a gestione pubblica.

²⁰⁶L'elezione di Donald Trump alla Presidenza degli Stati Uniti ha portato a una radicale modifica delle politiche climatiche degli Stati Uniti. Nei primi sei mesi del suo mandato Trump ha adottato provvedimenti che da un lato hanno rimosso una serie di restrizioni alle emissioni di CO_2 e dall'altro hanno incentivato l'aumento della produzione di gas e petrolio; ha inoltre deliberato il ritiro degli Stati Uniti dagli Accordi di Parigi e dalla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) e licenziato centinaia di dipendenti della National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), un'agenzia scientifica del governo degli Stati Uniti che si occupa di monitorare e studiare gli oceani, l'atmosfera e il clima per comprendere meglio i fenomeni naturali e proteggere l'ambiente e inoltre fornisce previsioni meteo, avvisi di tempeste, uragani, tornado e altri eventi estremi, contribuendo alla sicurezza pubblica.

Appendice C: Gli scenari dell'NGFS

Gli scenari NGFS consentono di analizzare il modo in cui le politiche di mitigazione e gli sviluppi tecnologici, interagendo con l'economia, influenzano i rischi fisici e di transizione associati ai cambiamenti climatici; non sono previsioni, ma descrivono esiti futuri possibili.

Gli scenari NGFS si differenziano per la tempistica e l'ampiezza delle misure adottate per la transizione: si va dagli approcci più aggressivi e coordinati, che puntano a una neutralità carbonica rapida, fino a scenari in cui l'inerzia politica porta a conseguenze più pesanti in termini di impatti fisici ed economici.

Gli scenari sono stati disegnati per dare conto delle possibili combinazioni di rischio che si possono materializzare, ovvero:

- negli scenari di **transizione ordinata** le politiche climatiche sono introdotte tempestivamente e diventano progressivamente più ambiziose. Sia i rischi fisici sia quelli di transizione si mantengono bassi;
- l'assenza di azioni politiche mirate, che distingue gli scenari **hot house world**, porta a impatti fisici molto gravi e a conseguenze economiche e finanziarie severe a causa degli effetti incontrollati del riscaldamento globale. I rischi fisici risultano gravi e irreversibili, mentre quelli di transizione si mantengono moderati, pur aumentando a causa di politiche disordinate.
- negli scenari di **transizione disordinata** l'adozione delle misure di contenimento delle emissioni è ritardata e non è uniforme a livello settoriale e tra le nazioni. I rischi di transizione sono alti, mentre quelli fisici restano contenuti;
- politiche insufficienti ad azzerare le emissioni e la cui implementazione è continuamente procrastinata caratterizzano gli scenari **troppo poco, troppo tardi**, in cui tanto i rischi fisici quanto quelli di transizione raggiungono livelli elevati.

Per generare gli scenari NGFS vengono simulati più modelli: tre MVI (REMINDMAgPIE, GCAM e MESSAGEix-GLOBIOM) vengono utilizzati per quantificare i rischi di transizione stimando l'impatto delle politiche climatiche sul mercato dell'energia, sulle emissioni e sull'uso del suolo; per valutare i rischi cronici si fa ricorso ai modelli del Potsdam Institute (PIK), mentre quelli del Climate Analytics vengono utilizzati per la stima dei rischi acuti causati da inondazioni, siccità, cicloni tropicali e ondate di calore; il NiGEM infine viene

simulato per valutare la risposta delle variabili economiche e finanziarie ai rischi di transizione e fisici.

In uno studio curato da Aiello e coautori viene fornita una panoramica degli effetti sull'Italia del materializzarsi degli scenari prefigurati dall'NGFS.²⁰⁷ Scenari di transizione rapida e coordinata tra paesi avrebbero impatti economici significativamente meno negativi rispetto a quelli associati a una transizione disordinata o al mantenimento dello status quo. L'aumento della temperatura, identico a livello globale, sarebbe a fine secolo compreso tra 1,25 e 2,75°C, corrispondenti a emissioni negative a partire dal 2040 nello scenario più favorevole e di poco inferiori a quelle attuali in quello a politiche invariate ("hot house world"). La quota di energia prodotta da fonti rinnovabili aumenterebbe significativamente in tutti i casi, ma in misura maggiore in presenza di politiche che consentono una transizione ordinata. Il PIL si contrarrebbe in tutti gli scenari, risentendo in particolare dell'aumento dei rischi fisici: nel 2050 la perdita cumulata sarebbe pari al 4% nello scenario peggiore e all'1% in quello migliore. La spesa pubblica aumenterebbe in misura rilevante, dovendo compensare la riduzione degli investimenti privati causata dall'innalzamento della *carbon tax*. Inizialmente l'inflazione salirebbe sia in Italia sia nel resto dell'area dell'euro, sulla spinta del rialzo del prezzo dell'energia, spingendo la banca centrale ad adottare politiche monetarie più restrittive.

²⁰⁷Cfr. Aiello *et al.* (2024), i cui risultati si basano sugli scenari NGFS Phase IV. A novembre 2024 l'NGFS ha aggiornato i propri scenari, facendo ricorso a nuove stime della funzione di danno, allineandola alle più recenti ricerche scientifiche sul clima. Questi aggiornamenti comportano valutazioni più elevate del rischio fisico e richiedono prezzi del carbonio più alti per conseguire una transizione ordinata a un equilibrio caratterizzato da zero emissioni. Le perdite globali risultano di conseguenza significativamente più elevate (da 2 a 4 volte nelle simulazioni che arrivano al 2050). Cfr. NGFS (2024).

16 Riferimenti bibliografici

- [1] Aiello, Maria Alessia, C. Angelico, P. Cova, V. Michelangeli, 2024. "Climate-related risks for Italy: an analysis based on the latest NGFS scenarios", *Questioni di Economia e Finanza* 847, Banca d'Italia.
- [2] Angelini, Paolo, 2024. "Portfolio decarbonisation strategies: questions and suggestions", *Questioni di Economia e Finanza* 840, Banca d'Italia.
- [3] Archer, David, 2005. "The fate of fossil fuel CO₂ in geologic time", *Journal of Geophysical Research*, vol. 110.
- [4] Armour, Kyle C., J. Marshall, J.R. Scotto, A. Donohoe, E.R. Newsom, 2016. "Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport", *Nature Geoscience* vol. 9, pp. 549-555.
- [5] Archer, David, M. Eby, V. Brovkin, A. Ridgwell, L. Cao, U. Mikolajewicz, K. Caldeira, K. Matsumoto, G. Munhoven, A. Montenegro, K. Tokos., 2009. "Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* vol. 37(1), pp. 117-34.
- [6] Auffhammer, Maximilian, 2018. "Quantifying Economic Damages from Climate Change", *Journal of Economic Perspectives*, vol. 32(4), pp. 33-52.
- [7] Barrage, Lint, 2020. "Optimal Dynamic Carbon Taxes in a Climate-Economy Model with Distortionary Fiscal Policy", *The Review of Economic Studies*, vol. 87(1), pp. 1-39.
- [8] BCE, 2022. "La BCE adotta ulteriori misure per integrare il cambiamento climatico nelle proprie operazioni di politica monetaria", comunicato stampa del 4 luglio 2022.
- [9] Bosetti, Valentina, C. Carraro, M. Galeotti, E. Massetti, M. Tavoni, 2006. "WITCH, A World Induced Technical Change Hybrid Model", *The Energy Journal*, Special Issue. Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down, pp. 13-38.
- [10] Bufano, Mauro, F. Capasso, J. Di Giampaolo, N. Pellegrini, 2023. "Il sistema per lo scambio delle quote di emissione dell'UE (ETS UE)", *Banca d'Italia, collana Mercati, infrastrutture e sistemi di pagamento*, n. 39, luglio 2023.

- [11] Burke, Marshall, S. M. Hsiang, E. Miguel, 2015. "Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production", *Nature* 527, n. 7577, pp. 235–39.
- [12] Carleton, Tamma, A. Jina, M. Delgado, M. Greenstone, T. Houser, S. Hsiang, A. Hultgren, R. E. Kopp, K. E. McCusker, I. Nath, J. Rising, A. Rode, H. Kwon Seo, A. Viaene, J. Yuan, A. Tianbo Zhang, 2022. "Valuing the Global Mortality Consequences of Climate Change Accounting for Adaptation Costs and Benefits", *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 137, n. 4, pp. 2037–105.
- [13] Coase, Ronald H., 1960. "The Problem of Social Cost", *The Journal of Law and Economics*, vol. 3, pp. 1-44.
- [14] de Bruin, Kelly C., R.B. Dellink, R.S.J. Tol, 2009. "AD-DICE: an implementation of adaptation in the DICE model", *Climatic Change*, vol. 95, pp. 63–81.
- [15] Desmet, Klaus, E. Rossi-Hansberg, 2024. "Climate Change Economics over Time and Space", *Annual Review of Economics*, vol. 16, pp. 271-304.
- [16] European Commission, 2020. "Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC PESETA IV final report", a cura di L. Feyen, J. C. Ciscar, S. Gosling, D. Ibarreta, e A. Soria, Luxembourg: Publications Office.
- [17] Ferrari, Alessandro, V. Nispi Landi, 2023. "Toward a green economy: the role of central bank's asset purchases", *International Journal of Central Banking*, vol. 19(5), pp. 287-340.
- [18] Fraser, Alastair, T. Fiedler, 2023. "Net-zero targets for investment portfolios: An analysis of financed emissions metrics", *Energy Economics*, vol. 126, pp. 1-12.
- [19] Giglio, Stefano, M. Maggiori, K. Rao, J. Stroebel, A. Weber, 2021. "Climate Change and Long-Run Discount Rates: Evidence from Real Estate", *The Review of Financial Studies*, vol. 34(8), pp. 3527–3571.
- [20] Gillingham, Kenneth, W.D. Nordhaus, D. Anthoff, V. Bosetti, H. McJeon, G. Blanford, P. Christensen, J. Reilly, P. Sztorc, 2018. "Modeling Uncertainty in Integrated Assessment of Climate Change: A Multimodel Comparison", *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, vol. 5(4), pp. 791-826.

- [21] Golosov, Mikhail, J. Hassler, P. Krusell, A. Tsyvinski, 2014. "Optimal taxes on fossil fuel in equilibrium", *Econometrica*, vol. 82(1), pp. 41–88.
- [22] Gravelle, Hugh, R. Rees, 2004. "Microeconomics", 3rd Edition, Prentice Hall.
- [23] Hartzman, Samuel M., K. Shue, 2024. "Counterproductive Sustainable Investing: The Impact Elasticity of Brown and Green Firms", mimeo.
- [24] Hassler, John, P. Krusell, J. Nycander, 2016a. "Climate Policy", *Economic Policy*, vol. 31, issue 87, pp. 503-558.
- [25] Hassler, John, P. Krusell, A.A. Smith Jr., 2016b. "Environmental Macroeconomics", *Handbook of Macroeconomics*, vol. 2B, chapter 24.
- [26] Hassler, John, P. Krusell, 2018. "Environmental macroeconomics: The case of climate change", *Handbook of Environmental Economics*, vol. 4, chapter 8.
- [27] Hassler, John, P. Krusell, C. Olovsson, 2019. "Suboptimal Climate Policies", *Journal of the European Economic Association*, vol. 19(6), pp. 2895–2928.
- [28] Hassler, John, P. Krusell, C. Olovsson, 2021. "Directed Technical Change as a Response to Natural Resource Scarcity", *Journal of Political Economy*, vol. 129, n. 11, pp. 3039-3072.
- [29] Hassler, John, P. Krusell, C. Olovsson, 2023. "Finite Resources and the World Economy", *Journal of International Economics*, forthcoming.
- [30] Hassler, John, P. Krusell, C. Olovsson, 2024. "The macroeconomics of climate change. Starting points, tentative results, and a way forward.", Peterson Institute for International Economics, Working Paper 24-8.
- [31] Hsiang, Solomon, R.E. Kopp, 2018. "An Economist's Guide to Climate Change Science", *Journal of Economic Perspectives*, vol. 32, n. 4, pp. 3–32.
- [32] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996. "The Science of Climate Change", Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J.P. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callendar, A. Kattenberg, and K. Maskell, (eds.), Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- [33] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021a. "Cambiamento Climatico 2021: Sintesi per tutti", Working Group I Technical Support Unit.
- [34] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021b. "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers", Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I Technical Support Unit.
- [35] Kay, John, M. King, 2020. "Radical Uncertainty", The Bridge Street Press, London.
- [36] Kotchen, Matthew J., 2024. "Climate policy options", Handbook of the Economics of Climate Change, Vol. 1, Ch. 6.
- [37] Krautkraemer, Jeffrey A., 1998. "Nonrenewable Resource Scarcity", Journal of Economic Literature, 1998, vol. 36, issue 4, pp. 2065-2107.
- [38] Latini, Gianni, T. Orusa, M. Bagliani, 2020. "Lessico e nuvole: le parole del cambiamento climatico", Università degli Studi di Torino.
- [39] Matthews, Damon H., N.P. Gillet, P.A. Stott, K. Zickfeld, 2009. "The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions", Nature 459, pp. 829–833.
- [40] Nakov Anton, C. Thomas, 2023. "Climate-conscious monetary policy", Documentos de Trabajo, n. 2334.
- [41] NGFS, 2024. "NGFS long-term climate scenarios – Phase V. High-level overview", November 2024.
- [42] Nordhaus, William D., 1994. "Expert Opinion on Climate Change", American Scientist, vol. 82, pp. 920-937.
- [43] Nordhaus, William D., J. Boyer, 2000. "Warming the World: Economic Models of Global Warming", MIT Press.
- [44] Nordhaus, William D., 2008. "A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies", Yale University Press.
- [45] Nordhaus, William D., 2009. "An Analysis of the Dismal Theorem", Yale University Cowles Foundation Discussion Paper n. 1686.

- [46] Nordhaus, William D., 2012. "Economic Policy in the Face of Severe Tail Events", *Journal of Public Economic Theory*, vol. 14(2), pp. 197-219.
- [47] Nordhaus, William D., 2013. "Integrated Economic and Climate Modeling", in *Handbook of CGE Modeling*, Vol. 1, chapter 16.
- [48] Nordhaus, William D., P. Sztorc, 2013. "DICE 2013R: Introduction and User's Manual", disponibile all'indirizzo: <https://yale.app.box.com/s/whlqcr7gtzdm4nxnrfhvap2hlzebuvmv/file/1044222401276>.
- [49] Nordhaus, William D., 2017. "Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies", NBER Working Paper n. 22933.
- [50] Nordhaus, William D., A. Moffat, 2017. "A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis", NBER Working Paper n. 23646.
- [51] Pigou, Arthur C., 1920. "Economics of Welfare", MacMillan.
- [52] Pindyck, Robert S., 2013. "Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?", *Journal of Economic Literature*, vol. 51(3), pp. 860-872.
- [53] Pindyck, Robert S., 2017. "The Use and Misuse of Models for Climate Policy", *Review of Environmental Economics and Policy*, vol. 11(1), pp. 100-114.
- [54] Pindyck, Robert S., 2022. "Climate Future. Averting and Adapting to Climate Change", Oxford University Press.
- [55] Royal Swedish Academy of Sciences, 2018. "Economic Growth, Technological Change, and Climate Change", *Scientific Background on the Sveriges Riksbank Prize in Economic Sciences In Memory of Alfred Nobel 2018*.
- [56] Sinn, Hans W., 2008. "Public policies against global warming: a supply side approach", *International Tax Public Finance*, vol. 15(4), pp. 360-394.
- [57] Stanton, Elizabeth A., 2011. "Negishi welfare weights in integrated assessment models: the mathematics of global inequality", *Climatic Change* vol. 107, pp. 417-432.
- [58] Stern, Nicholas, 2007. "The Economics of Climate Change: The Stern Review", Cambridge: Cambridge University Press.

- [59] Tol, Richard S.J., G.W. Yohe, 2009. "The Stern Review: A deconstruction", *Energy Policy*, vol. 37(3), pp. 1032-1040.
- [60] Tol, Richard S.J., 2019. "Climate Economics", Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK.
- [61] van Beek, Lisette, M. Hajer, P. Pelzer, D. van Vuren, C. Cassen, 2020. "Anticipating futures through models: the rise of Integrated Assessment Modelling in the climate science-policy interface since 1970", *Global Environmental Change*, vol. 65, pp. 1-14.
- [62] van der Ploeg, Frederick, A. Rezai, 2019. "The Agnostic's Response to Climate Deniers: Price Carbon!", *European Economic Review*, vol. 111, pp. 70-84.
- [63] Weitzman, Martin L., 1974. "Prices vs. Quantities", *Review of Economic Studies*, vol. 41(4) pp. 477-491.
- [64] Weitzman, Martin L., 2009. "On modeling and interpreting the economics of catastrophic climate change", *Review of Economics and Statistics*, vol. 91(1), pp. 1-19.