



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE ECONOMICHE ED AZIENDALI
"M. FANNO"

CORSO DI LAUREA IN ECONOMIA

PROVA FINALE

"Cambiamento climatico tra evidenze scientifiche e analisi economica"

RELATORE:

CH.MO PROF. Thomas Bassetti

LAUREANDO: Vincenzo Morello

MATRICOLA N. 1216307

ANNO ACCADEMICO 2021 –2022

Dichiaro di aver preso visione del “Regolamento antiplagio” approvato dal Consiglio del Dipartimento di Scienze Economiche e Aziendali e, consapevole delle conseguenze derivanti da dichiarazioni mendaci, dichiaro che il presente lavoro non è già stato sottoposto, in tutto o in parte, per il conseguimento di un titolo accademico in altre Università italiane o straniere. Dichiaro inoltre che tutte le fonti utilizzate per la realizzazione del presente lavoro, inclusi i materiali digitali, sono state correttamente citate nel corpo del testo e nella sezione ‘Riferimenti bibliografici’.

I hereby declare that I have read and understood the “Anti-plagiarism rules and regulations” approved by the Council of the Department of Economics and Management and I am aware of the consequences of making false statements. I declare that this piece of work has not been previously submitted – either fully or partially – for fulfilling the requirements of an academic degree, whether in Italy or abroad. Furthermore, I declare that the references used for this work – including the digital materials – have been appropriately cited and acknowledged in the text and in the section ‘References’.

Firma (signature) *Vincenzo Morelli*

Sommario

Introduzione.....	3
Capitolo 1: Impatti del cambiamento climatico.....	5
1.1: Descrizione e impatti dell’effetto serra e dei cambiamenti climatici.....	5
1.2: Studi economici sull’impatto dei cambiamenti e possibili soluzioni.....	8
1.3: Modellazione empirica con modello DICE; Cambiamento climatico visto come dilemma sociale.....	14
Capitolo 2: Effetti del contributo di Nordhaus e cambio prospettiva.....	19
2.1: Critica a Nordhaus: potrebbe aver contribuito a ritardare gli interventi governativi.....	19
2.2: Cambio di prospettiva: un modello matematico degli investimenti.....	21
Capitolo 3: Conclusione.....	25
Bibliografia.....	28

Introduzione

In questo elaborato finale verrà trattato il tema del cambiamento climatico e dei suoi impatti economici sulla società attraverso una panoramica della letteratura sulla materia in questione. Nel corso dell'elaborato, l'argomento sarà trattato e approfondito sotto un punto di vista macroeconomico, attraverso un'analisi che si concentrerà su quelli che sono i principali impatti dei cambiamenti climatici sull'economia globale, nonostante questa tematica riesca a influire in tutti i campi dell'economia, come ad esempio in campo manageriale: i manager durante i processi decisionali di sviluppo aziendale non possono trascurare l'impatto ecologico della loro azienda; o ancora, il mondo della finanza ha subito l'influenza del cambiamento climatico, tanto che in tempi recenti sono nati i primi strumenti finanziari, indici e sistemi di rating sostenibili ESG (Environmental, Social and Governance).

L'importanza di un argomento vasto e discusso come quello dei cambiamenti climatici e delle loro catastrofiche ripercussioni sarà il motore della trattazione. Infatti, secondo numerosi studi si stima che in base alle scelte future dei governi mondiali si andrà incontro ad una spesa annua di circa l'1% del PIL mondiale per adattarsi ai cambiamenti climatici o ad una perdita compresa tra il 5% e il 20% del PIL mondiale. Un altro possibile scenario è la perdita di enormi aree metropolitane, che comporterebbe l'alterazione degli equilibri mondiali con delle conseguenze imprevedibili a livello economico e questo sarebbe riconducibile ai cambiamenti climatici perché l'effetto serra sta causando lo scioglimento dei ghiacciai, nonché il conseguente innalzamento del livello del mare che mette a repentaglio l'esistenza futura di città come Venezia, Amsterdam, San Francisco, Los Angeles e di tutte le altre che si affacciano sul mare e sul quale basano la loro economia, spesso ricoprendo anche ruoli importanti nell'economia mondiale con grandi porti strategici per il trasporto delle merci.

Gli studi e gli articoli scientifici utilizzati per la stesura dell'elaborato sono stati diversi ma quelli che hanno contribuito maggiormente sono principalmente due: il primo di Nordhaus W. "*Reflections on the Economics of Climate Change*" (1993) utilizzato come base di partenza e a tratti come metro di paragone e di confronto dei risultati ottenuti da questo studio e altri più recenti. Il secondo di Caetano M.A.L., Gherardi D.F.M., Yoneyama T. "*Optimal resource management control for CO₂ emission and reduction of the greenhouse effect, Ecological Modelling*"(2008) è stato utilizzato perché propone un modello matematico che, se venisse applicato, permetterebbe il raggiungimento contemporaneo di due obiettivi fondamentali nella lotta al cambiamento climatico, ossia il recupero di parte della quantità di CO₂ già presente nell'atmosfera attraverso un processo di rimboschimento e investire in tecnologie innovative sostenibili che abbassino il livello di emissioni di gas serra futuro.

L'obiettivo dell'elaborato è fare una ricognizione della letteratura teorica ed empirica sui cambiamenti climatici e sui loro impatti economici sulla società, mostrando come si sia evoluto nel tempo il pensiero della comunità economico-scientifica a riguardo e quali sono state le soluzioni proposte ai governi mondiali per cercare di arginare e risolvere il problema. Per riuscire a raggiungere questo obiettivo è stato importante mettere insieme i vari studi sul tema, cercando mettere in evidenza i vari cambiamenti di pensiero che si sono susseguiti negli anni e come siano cambiate di conseguenza anche le previsioni economiche nel tempo.

L'elaborato si articola come segue: nel Capitolo 1 descriviamo i principali lavori in campo scientifico sui cambiamenti climatici e sui loro impatti economici, utilizzando gli studi di Nordhaus e altri esponenti della comunità economica mondiale; nel Capitolo 2 discutiamo i principali punti di forza e di debolezza della letteratura in questione, citando anche delle possibili soluzioni suggerite dagli studi più recenti; nel Capitolo 3 traiamo delle indicazioni di politica economica utili per cercare di rallentare e risolvere il problema dei cambiamenti climatici prima che gli impatti diventino troppo grandi e rischino di creare degli effetti negativi irrimediabili.

Capitolo 1: Impatti del cambiamento climatico

1.1: Descrizione e impatti dell'effetto serra e dei cambiamenti climatici.

In questo capitolo analizzeremo gli impatti dell'effetto serra e dei cambiamenti climatici da un punto di vista economico-scientifico. Prima di elencare tali impatti, però, è opportuno dare un'adeguata definizione di cosa si intende per effetto serra e per cambiamenti climatici. L'effetto serra è un fenomeno naturale che permette l'esistenza degli esseri viventi, descritto da Nordhaus (1993) come il procedimento mediante il quale i gas radiativamente attivi come la CO₂ assorbono selettivamente la radiazione in diversi punti dello spettro e riscaldano così la superficie terrestre. I gas serra sono trasparenti alla radiazione solare in entrata ma assorbono quantità significative di radiazione in uscita; tramite questo particolare meccanismo questi gas riescono a trattenere parte del calore della radiazione solare e quindi mantenere una temperatura adatta alla vita. I principali gas serra sono l'anidride carbonica CO₂, il metano CH₄, l'ossido nitroso N₂O e i clorofluorocarburi. Tutti questi gas sono presenti in natura ma a causa delle attività antropiche, a partire dalla prima rivoluzione industriale, il loro livello di concentrazione atmosferica è aumentato esponenzialmente generando così un aumento della temperatura. Invece, per quanto riguarda i cambiamenti climatici l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), ossia il principale organismo internazionale per la valutazione del cambiamento climatico, li definisce come "cambiamenti nello stato del clima che può essere identificato da cambiamenti nella media e/o della variabilità delle sue proprietà e che persiste per un periodo prolungato, tipicamente decenni o più". Gli scienziati hanno calcolato che se non si riuscirà a ridurre il livello di emissioni di gas serra la temperatura potrebbe aumentare di 6 gradi entro il 2100.

Non è facile prevedere con precisione matematica gli effetti che potrebbero scaturire dall'aumento delle temperature perché qualsiasi modello climatico non è affidabile al 100% a causa nell'elevato numero di variabili presenti nel sistema, nonostante ciò, esistono comunque dei modelli che provano a quantificare i possibili impatti economici e non che l'effetto serra potrebbe causare, come ad esempio il modello DICE (Dynamic Integrated Model of Climate and Economy), su cui ci soffermeremo al paragrafo 3. Le principali ripercussioni sulla vita comune, e conseguentemente sull'economia mondiale, che potrebbero essere causate dall'effetto serra sono molte, e in gran parte risultano essere concatenate e con effetti su scala globale. Un recente studio, che si focalizza soprattutto sull'area mediterranea, mette in evidenza l'aumento del rischio di incendio in termini di durata e siccità almeno fino al 2100 a causa del riscaldamento globale (Lestienne, Vannièr, Curt, Jouffroy-Bapicot, Hély, 2022); questi eventi si stanno verificando con forti ripercussioni in tutto il mondo, basti pensare agli incendi verificatisi in Australia e Sud America negli ultimi anni, che sono solo alcuni degli esempi che si potrebbero citare.

Un altro impatto dei cambiamenti climatici che evidenzia l'elevato livello di concatenazione di questi fenomeni è lo scioglimento dei ghiacciai perché non è altro che il frutto di diversi impatti. Di fatto, lo scioglimento dei ghiacciai è dovuto all'innalzamento delle temperature, ma tutto parte da cambiamenti precedenti. Uno fra questi è l'effetto *albedo*, che permette da un lato la riflessione di parte delle radiazioni solari che arrivano sulla superficie terrestre e che colpiscono le superfici chiare, quali neve o ghiaccio, mentre dall'altro lato l'assorbimento delle radiazioni solari da parte delle superfici più scure, come vegetazione, terreno, asfalto, ecc. Tutto il calore assorbito per merito dell'effetto albedo viene irradiato nell'aria e a causa dell'effetto serra viene trattenuto e questo fa sì che temperatura del pianeta si mantenga più o meno costante. Se non esistesse tutto questo meccanismo naturale la temperatura media della Terra sarebbe di circa -18°C . Il problema sorge quando le temperature aumentano e, provocando lo scioglimento delle superfici chiare, causano un aumento di quelle scure, il che non fa altro che incrementare la quantità di radiazioni solari assorbite e quindi la temperatura terrestre. Come si può facilmente intuire, lo scioglimento dei ghiacciai non è altro che uno degli effetti su vasta scala di questa catastrofica concatenazione di eventi. Ma la catena non finisce qui, dal momento che la fusione dei ghiacciai coinvolge ovviamente anche il permafrost: le zone ricoperte da ghiacciai perenni come il Nord Europa, la Siberia e le regioni artiche. Ingels [et al] (2020) spiega che i modelli computerizzati che mettono in relazione la calotta glaciale e la dinamica climatica con emissioni ininterrotte prevedono un potenziale aumento del livello del mare su scala mondiale che sarà maggiore di 1m entro il 2100 e maggiore di 15m entro il 2500 a causa dello scioglimento della calotta glaciale. Inoltre, se si amplia ulteriormente l'orizzonte temporale si prevede di arrivare addirittura a 58m nei prossimi 10.000 anni. L'innalzamento del livello del mare è attualmente uno degli effetti del cambiamento climatico che più preoccupa il mondo scientifico perché mette a repentaglio l'equilibrio e la futura esistenza degli ecosistemi costieri, le popolazioni umane e le infrastrutture a livello globale.

Ogni essere vivente ha un impatto nell'ecosistema in cui vive perché è costretto ad interagire con l'ambiente per compiere le azioni vitali, ad esempio la nutrizione e la respirazione. Le interazioni che si possono avere sono principalmente di due tipi: attive e passive. Le prime sono quelle in cui l'organismo compie un'azione di sua spontanea volontà, come ad esempio un leone che si ciba di un'antilope; mentre le seconde sono quelle non volontarie, spesso figlie di un'interazione volontaria, come l'atto dell'impollinazione compiuto dalle api o da altri insetti e volatili. Originariamente tutte queste interconnessioni erano bilanciate e ogni habitat aveva un suo equilibrio, successivamente con l'antropizzazione dell'ambiente molti di questi equilibri sono stati spezzati in favore dello sviluppo della società umana.

Di fatto, l'essere umano ha iniziato a interferire con il delicato equilibrio naturale fin dalla prima rivoluzione agricola, 12500 anni fa circa, e nel corso dei secoli è riuscito a deforestare il 56% degli alberi presenti prima della civilizzazione. Va precisato che in questo caso si parla di deforestazione perché le piante che sono state rimosse dal terreno non sono state sostituite con altre nuove o comunque non è stato fatto per rinnovare la flora dei vari boschi; in questo caso si parlerebbe di disboscamento. Questo comportamento dell'uomo ha avuto e continua ad avere un enorme impatto sui cambiamenti climatici perché, mentre le emissioni di gas serra continuavano ad aumentare, il numero di alberi presenti sul pianeta diminuiva e di conseguenza anche la quantità assorbita dalle piante di CO₂; addirittura secondo lo studio "Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests" (Hubau, Lewis, Phillips, 2020) le foreste amazzoniche e africane hanno perso 2/3 della loro capacità di assorbire CO₂ (dal 17% al 6%).

Un ulteriore impatto dei cambiamenti climatici, che purtroppo abbiamo avuto modo di vivere in questi ultimi due anni e per questo merita di essere trattato, è la relazione tra questi ultimi e le pandemie. L'aumento delle temperature, causato da tutti i fenomeni già trattati e altri come allevamenti intensivi e sovrappopolazione, spinge molte specie animali a dover trovare un nuovo habitat dove vivere, perché il loro d'origine viene invaso e reso inospitale. La migrazione degli animali però li spinge e li porta ad avere un contatto molto più ravvicinato rispetto al solito con l'uomo, aumentando così il rischio di zoonosi, ossia malattie che si trasmettono dagli animali all'uomo. Nella storia i casi di patologie nate a causa di un salto di specie sono molti, alcuni di questi sono la rabbia, il morbillo o il vaiolo; da uno studio di Bayer, Manica e Mora sulle origini del Covid-19 è emerso che il cambiamento climatico potrebbe aver svolto un ruolo chiave nel suo processo di evoluzione o nella trasmissione. In particolare, si stima che le aree delle regioni intorno all'Africa centrale, America centrale, soprattutto la provincia cinese meridionale dello Yunnan e regioni limitrofe come Myanmar e Laos, hanno registrato un significativo aumento delle specie di pipistrelli come risultato dell'aumento della temperatura causato dai cambiamenti climatici. Questo ha permesso a diverse specie, portatrici di diversi agenti patogeni, di entrare in contatto e generare in nuovo tipo di SARS-CoV, il SARS-Cov-2. Successivamente, a causa dei cambiamenti climatici gli esseri umani sono entrati in contatto con i pipistrelli ed è avvenuto il salto di specie (Bayer, Manica e Mora, 2021). La diffusione del Covid-19 ha messo in luce la stretta correlazione tra l'ambiente e l'economia: ciò che fa riflettere è che in uno dei momenti di maggiore crisi dell'economia mondiale, l'ambiente abbia ripristinato una forma di equilibrio, seppur parziale, grazie alla riduzione dell'impronta ecologica dell'uomo.

1.2: Studi economici sull'impatto dei cambiamenti e possibili soluzioni.

Molte organizzazioni ambientaliste, scienziati e, anche se più recentemente, una buona fetta della popolazione mondiale chiedono da anni la riduzione delle emissioni di gas serra e gli aiuti dei governi. A dire la verità il primo segnale dal mondo scientifico era arrivato già nel 1896, quando lo scienziato svedese Svante Arrhenius aveva esternato la sua preoccupazione riguardo lo sviluppo della società industriale a causa dell'aumento delle emissioni di CO₂; dopo di lui molti altri scienziati hanno iniziato a manifestare il loro dissenso e hanno cercato di sensibilizzare i governi ma purtroppo sono stati ignorati per decenni a causa degli eventi che hanno condizionato il XX secolo.

Dalla prima rivoluzione industriale l'intera popolazione ha iniziato ad utilizzare un modello di economia lineare secondo il quale per produrre una maggiore quantità di beni è sufficiente adottare una tecnologia produttiva più efficiente o adeguare la quantità dei fattori produttivi in entrata. La fiducia nel progresso tecnologico-sociale non permise di osservare chiaramente come il modello economico lineare stesse causando più danni che benefici al mondo, questo perché l'uomo si era convinto che la tecnologia potesse risolvere ogni problema, cambiando quindi la concezione di adattamento perché, nell'immaginario comune, non era più l'uomo a doversi adattare al pianeta ma viceversa. Questa convinzione ha portato la società a concentrare la propria attenzione su problemi ritenuti più importanti come salari, politica, disoccupazione e welfare (Nordhaus, 1993).

Fortunatamente col tempo e in particolare dagli anni Sessanta del XX secolo, grazie alle sollecitazioni di alcuni economisti, come Barbara-Ward-Jackson e Kenneth Ewart Boulding, vennero portati alla luce i diversi problemi di questo modello economico, quali l'errata considerazione delle risorse naturali come uno stock infinito e la mancata valutazione del fattore inquinamento. L'arrivo delle prime critiche all'economia lineare e la crescente preoccupazione del mondo scientifico riguardo le emissioni rilasciate dalle attività antropiche furono il primo passo per un cambio di rotta e portarono alla nascita degli studi sui cambiamenti climatici e sulle loro implicazioni economiche.

La maggior parte degli studi in materia si concentrano sulla temperatura media globale perché è un indice che comprende quasi tutte le variabili principali (livello d'acqua, siccità o gelo, incendi, ecc.), quindi è altamente correlato con i cambiamenti climatici. I modelli climatici sono molto simili ai modelli macroeconomici perché sono sviluppati per poter rispondere a determinati input selezionati dall'autore, questo però è anche un loro difetto perché spesso il modellatore non è in grado di considerare tutte le variabili in gioco e questo fa perdere di significato il modello (Nordhaus, 1993). I principali autori degli studi economici sull'impatto dei cambiamenti climatici sono Nordhaus, Cline e Fankhauser, i cui lavori per la ricerca e per lo sviluppo di modelli utili a combattere i cambiamenti climatici sono stati fondamentali. Il primo passo di questi economisti è stato capire quali settori potessero essere più influenzati dai cambiamenti climatici, perché come è facile aspettarsi il settore

primario è molto più soggetto a tali impatti rispetto al settore terziario, che comunque non sarebbe graziato. Inoltre, un altro aspetto da tenere in considerazione sono le grandezze e la potenza dei paesi perché le economie solide sono meno vulnerabili rispetto alle economie dei paesi emergenti.

Una volta trovati i settori sui quali i cambiamenti climatici potrebbero avere un impatto maggiore e deciso lo stato su cui concentrare l'indagine, i tre studiosi hanno potuto iniziare a sviluppare i loro modelli. Usando come punto di partenza le considerazioni elencate in precedenza i primi studi si sono concentrati sugli USA, perché all'epoca era uno dei pochi stati sul quale si avevano a disposizione una quantità di sufficiente e affidabile di informazioni per ogni settore; secondo Nordhaus (1993) alcuni studi hanno stimato l'impatto di un raddoppio equilibrato della CO₂ (da 2,5° a 3° C) sugli Stati Uniti, e i risultati di tre di queste indagini sono mostrati nella Tabella 1. Nella prima colonna della tabella 1 possiamo notare i risultati di Nordhaus (1991) aggiornati ai prezzi del 1988, mentre gli altri due studi completi di Cline (1992) e Fankhauser (1993) usano in gran parte la stessa base di dati con la differenza che estendono l'analisi di Nordhaus ad altri settori. La convenzione usata nella maggior parte degli studi sui danni è di calcolare gli impatti in termini di livello e composizione odierna della produzione.

Tabella 1

**Confronto delle stime dell'impatto del riscaldamento globale sugli Stati Uniti:
Impatto sui redditi del raddoppio di CO₂**
(in miliardi di dollari USA del 1988 all'anno)

	<i>Nordhaus</i>	<i>Cline</i>	<i>Fankhauser</i>
Settori fortemente colpiti			
Agricoltura	1	15.2	7.4
Aree costiere	10.7	2.5	2.3
Energia	0.5	9	0
Altri settori	38.1		
Perdita di zone umide e di specie	^b	7.1	14.8
Salute e amenità	^b	8.4	30.3
Altro	^b	11.2	12.1
Miliardi di dollari	50.3	53.4	66.9
(Percentuale della produzione)	1.0	1.1	1.3

^aI riferimenti sono Nordhaus (1991), Cline (1992), Fankhauser (1993).

^bQuesti sono inclusi nel totale per "altri settori".

I risultati di questi studi sono abbastanza simili: Nordhaus (1991) stima una perdita di 50.3 miliardi di dollari, Cline (1992) di 53.4 miliardi di dollari e Fankhauser (1993) di 66.9 miliardi di dollari con rispettivamente una perdita percentuale della produzione dell'1%; 1,1% e 1,3%. Le minime differenze che emergono sono dovute a delle ipotesi dei singoli autori o alla considerazione di una regione più ampia e non solo limitata agli USA; Nordhaus (1993, pp. 15) stesso espresse le sue perplessità riguardo lo studio di Cline (1992): “ le stime di Cline sull'impatto delle perdite dovute

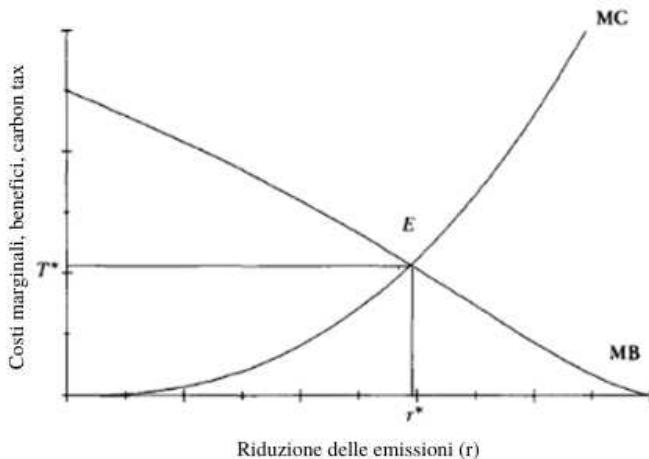
alle tempeste presuppongono che le tempeste diventino più gravi, mentre sia l'IPCC che gli studi della National Academy hanno concluso che l'effetto del riscaldamento sull'intensità delle tempeste è ambiguo". Invece, Fankhauser (1993) nel suo modello inserì anche i paesi dell'OCSE, ampliando così il campione. Delle analisi più recenti Reilly e Hohmann (1993) e Bahinipati (2011) hanno evidenziato la possibilità che gli studi citati in precedenza abbiano sovrastimato l'impatto dei cambiamenti climatici perché non hanno considerato l'adattamento, ma di questa possibile soluzione parleremo più avanti nella trattazione.

Un ulteriore esempio di come un aumento del campione utilizzato per il modello e la considerazione dell'adattamento possano influire sul risultato ci è dato da uno studio di Mendelsohn, Nordhaus e Shaw (1993) i quali provarono ad utilizzare un tipo di approccio che permettesse di utilizzare tutte le forme di adattamento, e non solo alcune come nei modelli basati sulla funzione di produzione, in un'analisi alla "riciardiana" che stimava le rendite al clima in particolari zone climatiche e poi le utilizzava per stimare l'impatto del cambiamento climatico sul reddito. In questo studio i tre autori utilizzano dati trasversali sul clima, i prezzi dei terreni agricoli e altri dati economici e geofisici per circa 3000 contee negli USA e, applicando il modello a uno scenario di riscaldamento globale, sono riusciti a trovare una serie di possibili impatti sul mercato dei cereali, calcolando perdite tra i 6 e gli 8 miliardi di dollari l'anno. Le previsioni mutarono molto quando il modello venne applicato a tutte le colture perché il risultato cambiò totalmente, arrivando addirittura a prevedere un impatto che oscillava tra una perdita di 0.7 miliardi di dollari o addirittura un guadagno di 2 miliardi di dollari.

Negli anni i vari studi e modelli hanno proposto molte soluzioni per cercare di ridurre l'impatto dei cambiamenti climatici. Alcuni sono stati proposti da Nordhaus (1993) perché, secondo il suo parere, l'obiettivo della ricerca economica è di esaminare le politiche che troveranno un equilibrio, al margine, tra i costi dell'azione per cercare di frenare il cambiamento climatico e i benefici della riduzione dei potenziali danni futuri. Per riuscire a perseguire questo obiettivo sviluppò un modello teorico in cui "I benefici della riduzione delle emissioni vengono quando le emissioni più basse riducono i danni futuri indotti dal clima. Per tradurre questi benefici in una funzione di beneficio marginale, è necessario seguire le emissioni attraverso le concezioni di gas serra fino agli impatti economici, e poi prendere il valore attuale dell'impatto di un'emissione di un'unità addizionale." (Nordhaus, 1993, pp. 18). Graficamente, come possiamo vedere nella Figura 1, significa trovare i danni marginali per unità di riduzione delle emissioni come punto di intersezione con la curva dei

benefici marginali (MB) inclinata negativamente e il costo marginale della riduzione delle emissioni (MC), o di qualsiasi altra politica utile a ridurre le emissioni, inclinato positivamente.

Figura 1
Costi marginali e benefici del controllo dell'emissione di gas serra



Note: la politica efficiente arriva al punto E, dove il costo marginale di un'ulteriore riduzione delle emissioni (MC) è uguale al beneficio marginale della riduzione delle emissioni nel rallentare il cambiamento climatico (MB). T^* è la carbon tax efficiente mentre r^* è il tasso di riduzione efficiente.

Nordhaus (1993) propone anche un'altra soluzione: compensare il riscaldamento provocato dall'effetto serra attraverso l'ingegneria climatica, cercando di aumentare artificialmente l'effetto albedo, già descritto in precedenza, della Terra. I modi che propone sono essenzialmente due, ossia l'installazione di specchi intelligenti nello spazio o lo spargimento del ferro negli oceani in modo tale da accelerare l'assorbimento del carbonio. In ogni caso, a prescindere dall'approccio, dal punto di vista economico è importante il rapporto costo-efficacia perché i governi dovrebbero prendere delle decisioni che mirano ad ottenere la massima riduzione del cambiamento climatico per un dato livello di spesa. Dalla figura 1 possiamo capire che le politiche efficienti riescono a bilanciare i costi marginali e benefici marginali della riduzione delle emissioni, infatti, possiamo notare che la soluzione del mercato puro arriva con riduzioni di emissioni a 0, dove MB è molto al di sopra del MC zero. Infine, il punto E rappresenta il punto efficiente in cui i costi di abbattimento marginali sono pari ai benefici marginali derivanti dal rallentamento del cambiamento climatico. La politica può essere rappresentata dalla riduzione frazionaria efficiente delle emissioni, r^* sull'asse orizzontale, o dalla carbon tax ottimale, T^* sull'asse verticale; Nordhaus (1993). In realtà le soluzioni proposte dalla comunità scientifica ed economica sono molte come ad esempio l'adattamento, la compensazione e la negoziazione delle emissioni e il rimboschimento. I

principali studi che hanno trattato l'adattamento sono stati condotti da Reilly e Hohmann (1993), Stern (2006) e Bahinipati (2011), i quali lo descrivono come il modo in cui gli individui, le comunità e le società adattano le loro attività per trarre vantaggio dai flussi dei sistemi socio-ecologici. I motivi per cui si considera l'adattamento una buona alternativa per mitigare le conseguenze dei cambiamenti climatici sono essenzialmente tre:

- 1) Le emissioni già presenti sono difficilmente recuperabili.
- 2) Un adattamento ex-ante è più efficace, meno costoso e sostenibile di uno ex post.
- 3) Le persone che vivono già in contesti difficili, dove il livello di povertà è molto alto, vedranno aggravare la loro situazione.

Settore	UNFCCC (2007)			Economics of Adaptation to Climate Change study in Developing Nations (World Bank, 2010) (in miliardi di dollari nel 2050)	
	Costo globale (In miliardi di dollari nel 2030)	Di cui		National Centre for Atmospheric Research (NCAR), scenario più umido	Commonwealth Scientific and Industrial research Organization (CSIRO) scenario più secco
		Nazioni Sviluppate	Nazioni in via di sviluppo		
Infrastrutture	8-130	6-88	2-41	29.5	13.5
Zone costiere	11	7	4	30.1	29.6
Approvvigionamento di acqua e protezione del cibo	11	2	9	13.7	19.2
Agricoltura, silvicoltura e pesca	14	7	7	7.6	7.3
Salute	5	0	5	2	1.6
Eventi meteorologici estremi	-	-	-	6.7	6.5
Totale	49-171	22-104	27-67	89.6	77.7

Tabella 2: studi di seconda generazione sui costi di adattamento condotti dall' UNFCC e dalla Banca mondiale

La metodologia utilizzata in questi studi consiste nel valutare l'impatto potenziale dei cambiamenti climatici nelle società due volte: con e senza adattamento. Il risultato è estremamente importante perché Stern (2006) ha stimato un costo di adattamento pari all' 1% del PIL mondiale ogni anno contro una perdita futura che varia tra il 5% e il 20% del PIL mondiale senza adattamento. Come possiamo vedere nella Tabella 2 questo tipo di studi ha portato alla nascita di studi di seconda generazione, ad opera dell'UNFCCC (2007) e della World Bank (2010), che hanno cercato di stimare i costi d'adattamento ai cambiamenti climatici della società, sia per i paesi sviluppati sia per i paesi emergenti.

Un'altra soluzione proposta dalla comunità scientifico-economica è la compensazione delle emissioni e/o la negoziazione delle stesse. Questa soluzione è stata concepita dal Protocollo di Kyoto (1997) e dall' Accordo di Parigi (2015) che, oltre ad un piano per ridurre le emissioni di gas serra, prevede l'introduzione di un tetto massimo di emissioni per paese. Per compensazione si intende l'atto di bilanciamento della quantità di CO₂ generata dalle attività umane che può essere fatto in vari modi, tra i quali l'utilizzo di fonti rinnovabili, un miglioramento dell'efficienza produttiva o investendo in attività virtuose che puntino a ridurre la quantità di gas serra come ad esempio il rimboschimento.

Contestualmente è stato creato un meccanismo che permette lo scambio delle quote di emissioni non raggiunte tra i paesi, in modo tale in modo tale che, nel caso in cui un paese virtuoso riuscisse a produrre meno emissioni del previsto, possa vendere la quota rimanente di emissioni ad un altro paese che, invece, ha sfiorato la sua. L'obiettivo della creazione di questo mercato è quello di riuscire a mantenere sotto controllo il livello totale delle emissioni di gas serra, anche attraverso la "materializzazione" dell'inquinamento perché così gli stati meno attenti alla questione si troverebbero a dover pagare ingenti somme per poter continuare le loro attività. L'ultima soluzione che tratteremo, collegata alla compensazione, è quella del rimboschimento, un'idea che, dopo il già citato Accordo di Parigi (2015), ha attirato l'attenzione dei più. L'intuizione di base è abbastanza semplice perché se l'assorbimento da parte della CO₂ presente nell'aria dipende dagli alberi e la loro riduzione a causa della deforestazione sta portando all'aumento di CO₂, basterà ripristinare la flora per poter ridurre la quantità di CO₂ presente nell'atmosfera (Mandel, 2022). Inoltre, per le aziende o gli stati che inquinano di più è il metodo più facile per cercare di ridurre la propria impronta ambientale non cambiando nulla all'interno della propria struttura; anche se questo può avere degli aspetti negativi che analizzeremo nel prossimo capitolo.

1.3: Modellazione empirica con modello DICE; Cambiamento climatico visto come dilemma sociale.

Uno dei primi a compiere una modellizzazione empirica che cercasse di quantificare quale costo comporterebbe rallentare i cambiamenti climatici è stato Nordhaus. Un suo studio del 1991 concludeva che la minaccia del riscaldamento dell'atmosfera era sufficiente a giustificare passi a basso costo per il rallentamento del ritmo del cambiamento climatico. Due anni dopo riuscì a realizzare un'elaborazione più completa che chiamò "Modello DICE", Nordhaus (1993) lo descrive come un modello di ottimizzazione dinamica globale per stimare il percorso ottimale di riduzione delle emissioni di gas serra. Lo scopo finale è di calcolare il percorso ottimale sia per l'accumulo di capitale sia per la riduzione delle emissioni di gas serra nel quadro del modello di Ramsey (1928) di scelta intertemporale. La traiettoria risultante può essere interpretata come il percorso più efficiente per rallentare il cambiamento climatico dati gli input e le tecnologie; mentre, un'interpretazione alternativa è come un equilibrio di mercato competitivo in cui le esternalità o gli effetti di spillover sono corretti usando i prezzi sociali appropriati per le emissioni di gas serra.

Il modello DICE chiede se consumare beni e servizi, investire in capitale produttivo o rallentare il cambiamento climatico attraverso la riduzione delle emissioni di gas serra. Il percorso ottimale risultante è quello che massimizza una funzione obiettivo che è la somma scontata delle utilità del consumo pro capite. Il consumo e l'investimento sono vincolati da un insieme convenzionale di relazioni economiche (funzione di produzione Cobb-Douglas, equazione di equilibrio del capitale, e così via) e da un nuovo insieme di vincoli geofisici aggregati ad esempio interrelazione tra attività economica, emissioni e concentrazioni di gas serra, cambiamento climatico, costi di riduzione e impatti del cambiamento climatico. Nordhaus (1993) ha anche applicato il modello DICE confrontando l'ottimizzazione teorica descritta nel paragrafo precedente con due politiche proposte dai governi o dalle comunità ambientali: stabilizzazione delle emissioni di gas serra ai livelli del 1990 e stabilizzazione del clima per limitare l'aumento della temperatura a $0,2^{\circ}\text{C}$ per decennio. La figura 2 mostra le tasse sul carbonio che dovrebbero essere applicate tramite il modello DICE, limitato agli Stati Uniti, per queste 3 differenti politiche; questo produrrebbe una sequenza temporale di consumo, investimenti, emissioni di gas serra e tasse sul carbonio. Queste ultime possono essere interpretate come tasse sulle emissioni di gas serra che porterebbero al raggiungimento degli obiettivi politici proposti.

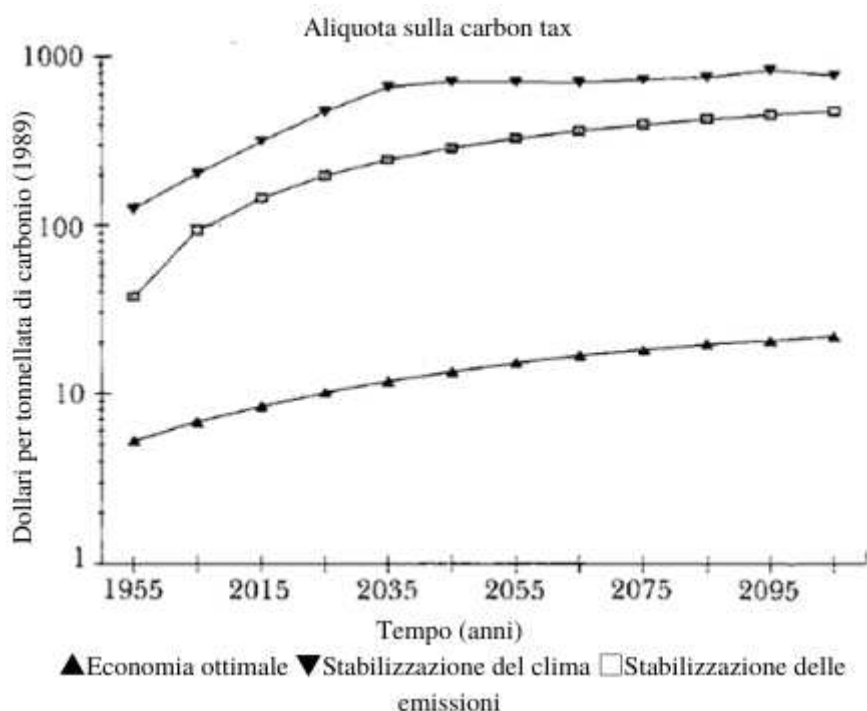


Figura 2: Calcolo tasse sul carbonio per le 3 politiche

I risultati sono abbastanza netti, infatti:

- 1) La teoria dell'economia ottimale produce le tasse sul carbonio più basse tra i 3 scenari: tra i 5 e i 20 dollari entro il 2095.
- 2) La teoria di stabilizzazione delle emissioni produce tasse sul carbonio che oscillano tra i 40 e i 500 dollari entro la fine del secolo.
- 3) La teoria di stabilizzazione del clima comporta tasse sul carbonio che variano tra i 100 e i 1000 dollari per lo stesso orizzonte temporale.

Il modello può anche essere utilizzato per estendere l'analisi a livello globale ma il risultato, seppur con proporzioni diverse, non sarebbe diverso, Nordhaus (1993) stima, infatti, che per l'economia mondiale la sua teoria di ottimizzazione avrebbe un beneficio di 270 miliardi di dollari mentre le teorie di stabilizzazione delle emissioni e del clima avrebbero una perdita rispetto alla soluzione ottima appena citata di 7 e 41 trilioni di dollari. Inoltre, sempre Nordhaus stima che convertendo le cifre del valore attuale in rendite di consumo e utilizzando un tasso di rendita del 4% le tre strategie rappresenterebbero rispettivamente un guadagno del 0,05% della produzione mondiale annua lorda per la strategia dell'economia ottimale e una perdita del 1,4% e dell'8,2% della produzione mondiale annua lorda mondiale per le strategie di stabilizzazione delle emissioni e del clima. Oltre ad applicare il modello DICE come appena descritto Nordhaus (1993) l'ha

applicato anche per calcolare la proiezione dell'aumento della temperatura che si sarebbe potuta raggiungere mantenendo i comportamenti dei primi anni '90 e comparando i risultati con la stessa proiezione fatta dall' IPCC con altro modello economico. La figura 3 mostra “come linee solide il 10°, 50° e 90° percentile della distribuzione dell'aumento di temperatura dal modello DICE mentre le linee tratteggiate sono il rapporto dell'IPCC e rappresentano, dall'alto verso il basso, la stima alta, la stima migliore e la stima bassa.”.

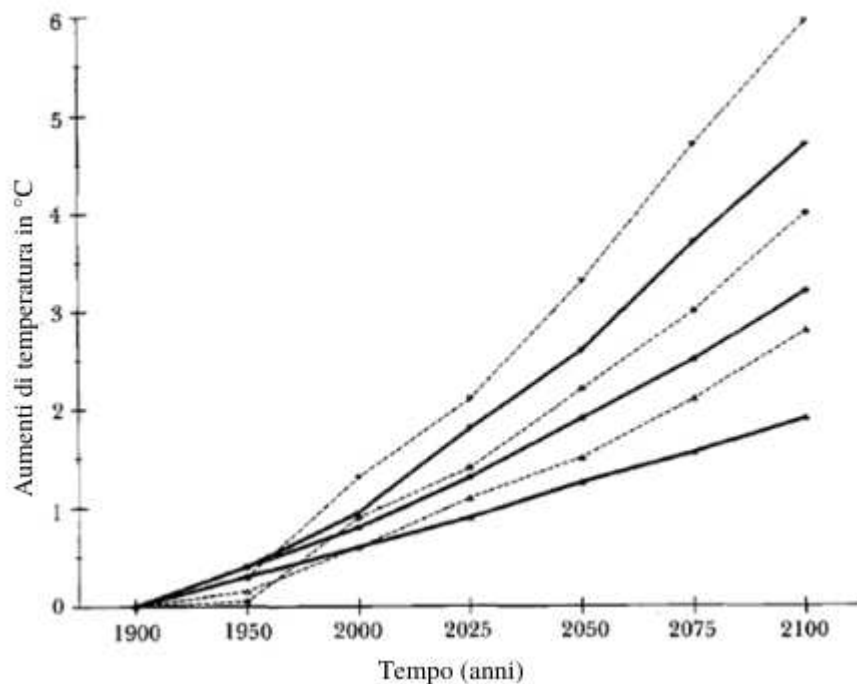


Figura 3
Proiezioni dell'aumento della temperatura globale: report IPCC e Modello DICE

Dopo aver comparato i risultati lo stesso Nordhaus aveva espresso la propria preoccupazione perché intuiva che la temperatura del pianeta sarebbe aumentata come mai era successo nella storia del pianeta.

Un altro aspetto che ci fa notare quanto sia diventata importante la tematica dei cambiamenti climatici è la nascita di discipline completamente dedicate come la psicologia ambientale. Druen e Zawadzki (2021), ricercatori dello York College of Pennsylvania, hanno descritto il cambiamento climatico e le azioni ad esso legate come un dilemma sociale e hanno elaborato una simulazione per studenti universitari, “Climate trap: social dilemma simulation”, in cui l'obiettivo dei partecipanti era di massimizzare il profitto rispetto ad un'ipotetica società di un altro partecipante. Lo scopo reale della simulazione era di far notare ai partecipanti come azioni che a prima vista non sembrano avere alcun impatto ambientale in realtà lo abbiano. Prima di descrivere la simulazione è opportuno fornire una definizione di dilemma sociale; gli autori della simulazione lo definiscono come: “una situazione in cui esiste un conflitto intrinseco tra l'interesse a breve e

lungo termine delle persone e tra il proprio vantaggio personale e quello comunitario.” Druen e Zawadzki (2021, pp. 2). Generalmente le persone sono orientate a compiere delle scelte più a breve termine perché portano a vantaggi personali immediati anche se questo va a discapito della società. Un esempio di ciò sono le emissioni di gas serra da parte delle aziende: i proprietari sono perfettamente consapevoli dell'inquinamento che causano ma non sono disposti a sostenere i costi di transizione che comporterebbe il cambiamento del loro modello d'impresa. Il dilemma sociale può portare a due reazioni principali: 1) gli individui non prendono in seria considerazione l'impatto dei comportamenti dei singoli sulla società intera 2) capiscono l'impatto che possono avere su un contesto sociale più ampio e conseguentemente iniziano ad agire in modo proattivo. Dato che il cambiamento climatico è un dilemma sociale, in genere influenza il processo decisionale delle persone per favorire il guadagno personale a breve termine rispetto agli interessi collettivi a lungo termine. La simulazione “Climate trap: social dilemma simulation” era impostata su 10 round in cui ogni studente era il direttore di una azienda che doveva decidere quanto produrre, in modo tale da massimizzare il proprio profitto rispetto al proprio competitor producendo un maggior numero di beni in un mercato competitivo. La produzione di beni era legata all'utilizzo dei combustibili fossili, che quindi avrebbero aumentato il profitto dell'azienda ma, allo stesso tempo, rilasciato gas serra e peggiorato il conto climatico. In ogni round i partecipanti dovevano scegliere se aumentare, diminuire o mantenere invariata la loro produzione e in base alle loro scelte e quelle dell'“avversario” il conto climatico sarebbe cambiato di conseguenza, situazione molto simile al dilemma del prigioniero. Alla fine dei 10 round vinceva lo studente che era riuscito a ottenere il profitto maggiore pur mantenendo il conto climatico al di sopra di una certa soglia. Inoltre, prima e dopo aver partecipato alla simulazione, agli studenti è stato somministrato un test per vedere come cambiasse la loro percezione dei cambiamenti climatici e delle azioni a loro legate. Ciò che è emerso dalla simulazione è che dopo averla completata gli studenti si sentissero più sicuri della loro conoscenza sui cambiamenti climatici, più sensibili alle loro azioni e soprattutto più favorevoli a sostenere delle politiche più attente a riguardo. Da un punto di vista pratico i risultati della simulazione hanno evidenziato che strumenti del genere potrebbero essere efficaci per formare gli studenti, dando loro l'occasione di mettere in pratica le loro conoscenze durante i vari step della prova, adattabile a vari corsi di studi, e allo stesso tempo aiutarli a prendere coscienza del problema del cambiamento climatico.

Dopo aver trattato alcune cause, impatti e possibili soluzioni del problema che sta cambiando il nostro pianeta e che rischia di causarne la fine, viene naturale chiedersi cosa stiano facendo i governi mondiali, dopo tutti i segnali lanciati dalla comunità economica e scientifica, per cercare di arginare questo pericolo. Secondo il parere di Nordhaus (1993) dato che, ai tempi, non si aveva

ancora la certezza che i cambiamenti climatici avrebbero potuto comportare delle conseguenze catastrofiche per l'economia mondiale e anche per il pianeta, la questione poteva essere declassata come problema di seconda classe e i governi avrebbero dovuto dare la precedenza a problematiche ritenute più importanti, come esempio guerre, consumo di droga, crisi del vecchio continente, esplosione dei paesi emergenti. Inoltre, pensava che la preoccupazione che si stava generando fosse dovuta solo alla gravità delle possibili conseguenze e sarebbe bastato applicare i “morbidi cambiamenti” previsti dai modelli globali. Addirittura, negli anni '90 sono stati anche condotti dei sondaggi che chiedevano a degli esperti di quantificare la probabilità che il riscaldamento globale potesse causare la perdita del 25% del PIL mondiale e che potesse toccare i 3°C entro il 2090 e i 6°C entro il 2175. Le valutazioni furono dello 0,5% per lo scenario che prevedeva i 3°C e del 3% per quello che prevedeva i 6°C, anche se le risposte cambiavano molto in base alla formazione dell'intervistato perché mentre gli scienziati prevedevano una probabilità del 40%, gli economisti prevedevano probabilità decisamente più basse. Nordhaus (1993) concluse la sua trattazione in maniera abbastanza netta, dicendo che “alla comunità scientifica spetta il compito di ordinare attraverso gli scenari apocalittici e ottenere giudizi approssimativi sulla probabilità dei diversi risultati in modo da distinguere tra probabile, plausibile e impossibile; agli scienziati sociali spetta il compito di valutare le probabilità, determinare i valori dei diversi esiti e concepire strategie per gestire le incertezze; mentre ai politici spetta l'onere di decidere come bilanciare i pericoli futuri con i costi presenti”.

Capitolo 2: Effetti del contributo di Nordhaus e cambio prospettiva.

2.1: Critica a Nordhaus: potrebbe aver contribuito a ritardare gli interventi governativi.

Negli ultimi anni, grazie agli sviluppi tecnologici dei media, e soprattutto di internet, le informazioni riguardanti i cambiamenti climatici sono diventate sempre più accessibili e a portata di tutti. La società ha sviluppato una sensibilità ecologica sempre maggiore e con essa un forte senso critico. In particolare, sono sorti molti interrogativi in merito alla mancata adozione da parte dei governi delle soluzioni proposte dalla comunità scientifica. Uno dei soggetti finiti al centro delle polemiche e ritenuto come uno dei responsabili della sottovalutazione dei cambiamenti climatici da parte dei governi è stato proprio Nordhaus, che ha ricevuto il premio Nobel nel 2018 per aver integrato il cambiamento climatico nell'analisi macroeconomica di lungo periodo, ma che d'altro canto è stato accusato da molti di aver contribuito a rimandare gli interventi governativi con i suoi studi. Le critiche più dure sono arrivate dal Club di Roma, Steinberger, Pottier, Hickel ma soprattutto da Keen (2020) che lo accusò di aver basato i suoi studi su paesi utili per supportare i suoi bias cognitivi, secondo i quali i cambiamenti climatici dovevano avere un impatto banale sull'economia mondiale. Un'altra critica mossa da Keen contro Nordhaus riguarda l'utilizzo dell'analisi costi-benefici per esaminare dei fenomeni macroeconomici a lungo termine come il cambiamento climatico: secondo le critiche, questi studi si basavano su una esplicazione eccessiva della realtà e non tenevano conto delle interconnessioni tra i vari fenomeni naturali come l'inquinamento, le emissioni di CO₂ e la limitatezza delle risorse naturali.

Masini (2021) analizza tutte le assunzioni di Nordhaus, cercando di capire quali fossero fondate e quali no, con lo scopo di capire se realmente il suo contributo alla lotta contro i cambiamenti climatici sia stato costruttivo o ostruttivo. Una delle prime assunzioni analizzate, riguarda la volontà da parte di Nordhaus di disincentivare un'interpretazione eccessivamente pessimista delle sue previsioni, in virtù del fatto che, nonostante la loro natura innegabilmente catastrofica, esse si sarebbero potute verificare in un futuro estremamente remoto, a distanza di circa 5000 anni. Un simile atteggiamento da parte dello studioso non faceva altro che influire sulla posticipazione di ogni possibile intervento ad opera dei governi perché, come lo stesso Nordhaus ammetteva, la pianificazione delle risorse naturali potrebbe essere miope a causa dell'orizzonte temporale di breve termine delle scelte politiche. Inoltre, Nordhaus continuava a sostenere che gli ambientalisti mostrassero un atteggiamento troppo pessimista in materia di previsioni sul cambiamento climatico, mentre d'altro canto gli economisti rivolgevano la loro attenzione verso questioni e problematiche dal loro punto di vista più importanti. Questa corrente di pensiero fu una delle cause della posticipazione degli interventi da parte dei governi.

Un'altra delle assunzioni che sono state analizzate e criticate, ha a che vedere con la fiducia di Nordhaus nella tecnologia e la sua convinzione che quest'ultima abbia condotto a un sempre maggiore isolamento dell'uomo e dell'attività economica dalle influenze climatiche. L'idea di base, sostenuta da Nordhaus in almeno due dei suoi lavori (1993 pp. 18 e 1995, pp. 275), era che il progressivo avanzamento della tecnologia riesce a rendere più efficienti i processi produttivi, a ridurre l'impatto ambientale e contemporaneamente abbassare anche il costo del prodotto finale. Ciò che Nordhaus non considera però è il cosiddetto "paradosso di Jevons". Dopo aver studiato il consumo di carbone in Inghilterra a seguito dell'introduzione del motore a vapore, Jevons affermò che i progressi tecnologici e il conseguente miglioramento dell'efficienza produttiva potrebbero portare a un aumento dei consumi piuttosto che a una loro diminuzione: più il processo di produzione diventa efficiente, ossia utilizza meno input, più i prezzi si abbassano. La conseguenza di questo meccanismo era un aumento di domanda, da un lato generato da parte dei consumatori che continuano ad acquistare lo stesso bene con la parte di investimento risparmiata, dall'altra da una nuova moltitudine di consumatori, quelli che prima non potevano permetterselo. Ciò che scaturì dall'aumento della domanda da parte dei consumatori fu perciò un aumento dell'offerta e questo non fece altro che innalzare nuovamente i livelli di consumo del carbone, al punto da superare i livelli di consumo precedenti all'introduzione dell'innovazione. A causa del cosiddetto "effetto contraccolpo", non è detto che le innovazioni tecnologiche abbiano solo impatti positivi, perché se le emissioni non vengono controllate adeguatamente, aspetto ignorato da Nordhaus, si rischia di peggiorare la situazione.

Keen (2020) sottolinea come Nordhaus stesso, dopo aver capito di essersi sbagliato sottostimando gli impatti del cambiamento climatico e fornendo delle previsioni troppo ottimistiche, abbia cambiato la sua posizione a riguardo. Infatti, Nordhaus (2013, pp. 325) dice: "vi sono prove chiare e convincenti che il pianeta si sta riscaldando; che se non si prenderanno provvedimenti incisivi, la Terra sperimenterà un riscaldamento superiore a quello che ha visto per oltre mezzo milione di anni; che le conseguenze dei cambiamenti climatici saranno costose per le società umane [...] si dovrebbe agire immediatamente per rallentare e infine arrestare le emissioni di CO₂ e di altri gas a effetto serra". Inoltre nella stessa pubblicazione, Nordhaus (2013), ammette che puntare alla soglia di un aumento di 2°C della temperatura mondiale, soglia che fino ad allora aveva considerato corretta, è praticamente impossibile. Più recentemente, ha pubblicato una stima aggiornata del modello DICE concludendo che la nuova soglia obiettivo per il riscaldamento globale dovrebbe essere fissata a 3,1C° (Nordhaus 2017).

Come si evince da quanto detto in precedenza, Nordhaus ha subito diverse critiche nel corso degli anni e come sostiene Hickel (2018) riassumendole efficacemente, se da una parte Nordhaus può

essere considerato come uno degli esponenti di maggiore spicco della comunità economica degli ultimi anni, dalla comunità delle scienze naturali il suo contributo alla lotta contro il cambiamento climatico è visto diversamente, perché ritengono che se i governi avessero ricevuto maggiore sollecitazione anche dagli esponenti della comunità economica, e da Nordhaus in quanto figura autorevole dell'analisi macroeconomica di lungo periodo applicata ai cambiamenti climatici, magari avrebbero preso più seriamente il problema dell'impatto di questi ultimi. Invece, studi di Nordhaus hanno erroneamente fornito dei risultati che hanno portato i governi mondiali ad adottare una politica accomodante nei confronti del cambiamento climatico e ne sono le prove i vari accordi sul clima non ratificati da alcuni stati, spesso quelli considerati più influenti come ad esempio la Cina e l'India che non hanno firmato il protocollo di Kyoto del 1997 o, ancora, Cina e Russia che non si sono presentati alla COP26, l'evento organizzato dalle Nazioni Unite per discutere delle possibili soluzioni riguardanti il cambiamento climatico. Nonostante ciò, è indubbio che sia comunque stato un pioniere degli studi dell'impatto economico di lungo periodo del cambiamento climatico e che abbia contribuito a dare il via a una serie di altri studi in materia.

2.2: Cambio di prospettiva: un modello matematico degli investimenti

Gli ultimi sviluppi in materia di lotta al cambiamento climatico stanno introducendo un cambio di prospettiva che non si concentra solamente sulla riduzione delle emissioni di gas serra nella maniera che ormai conosciamo, ma sulla riduzione di questi ultimi attraverso l'ottimizzazione dei processi produttivi. Nello specifico, l'idea è di utilizzare le ingenti somme di denaro, che verrebbero risparmiate grazie all'ottimizzazione, in due modi: in investimenti utili per cercare di sottrarre la quantità di gas serra già presente nell'atmosfera e per finanziare il progetto di ottimizzazione. Con quest'ottica Caetano, Gherardi e Yoneyama (2008) propongono un modello matematico che descrive la relazione dinamica dell'emissione di CO₂ con gli investimenti in rimboschimento e tecnologia pulita e che rappresenta un metodo per una gestione più efficiente delle risorse disponibili sotto forma di problema di controllo ottimale. Il modello si basa sulle idee di Stollery (1998) che prevedono l'introduzione di una tassa ottimale sulle emissioni, inizialmente alta ma che andrebbe diminuendo in correlazione all'abbassamento del livello delle emissioni, e il reinvestimento della somma ricavata da questa carbon tax per sostenere i consumi generati dall'impatto dell'esaurimento delle risorse e dai danni economici che comporta il riscaldamento globale. Il modello matematico elaborato da Caetano, Gherardi e Yoneyama (2008) analizza dei parametri ben precisi, ossia la concentrazione di anidride carbonica atmosferica, l'area forestale e il PIL, mettendoli in relazione attraverso delle equazioni differenziali ordinarie non lineari, allo scopo di modellare la dinamica delle emissioni di CO₂. La

differenza principale tra questo modello matematico e l'idea di Nordhaus consiste essenzialmente nel tipo di obiettivo che persegue, ossia favorire la riduzione al minimo dei costi di riforestazione e delle emissioni di CO₂ nell'atmosfera, invece di massimizzare la funzione di benessere sociale. I risultati del modello hanno evidenziato come sia possibile ottenere delle riduzioni significative delle emissioni di CO₂, attraverso l'ottimizzazione degli investimenti in rimboschimento e ricerca e sviluppo di tecnologie pulite. Nello specifico, nel 1996 le emissioni di CO₂ per l'Europa Occidentale ammontavano a 659,23 milioni di tonnellate e Caetano, Gherardi e Yoneyama (2008) hanno calcolato che se si fosse applicato il modello da loro proposto nello stesso anno, le emissioni avrebbero potuto essere di 606,24 milioni di tonnellate di CO₂, quindi una riduzione dell'8,7% rispetto al valore effettivo. Inoltre, applicando il modello di controllo ottimale anche la superficie di conifere sarebbe aumentata di circa 71,9 milioni di m³/anno contro i 64 milioni di m³/anno di aumento effettivo, quindi il 12,34% in più.

Se da un lato questo modello funziona, dall'altro presenta dei limiti non trascurabili. Uno fra questi, ad esempio, è la considerazione del PIL che risulta essere parziale a causa della mancata considerazione di fattori fondamentali come le conseguenze delle politiche di investimento, della mancata influenza dell'aumento del reddito dei cittadini e dalla considerazione solo dei tassi di trasferimento utili per il rimboschimento e gli investimenti in tecnologie green. Inoltre, questo modello ha anche un altro limite che ci porta a fare riferimento all'effetto contraccollo di Jevons, spiegato nel paragrafo precedente, che potrebbe essere innescato dall'idea secondo la quale il progresso tecnologico e i suoi effetti, come ad esempio la maggiore efficienza dei processi produttivi, possono avere degli effetti esclusivamente positivi. Per rimediare a quest'idea potenzialmente dannosa Brooker (2000) spiega che potrebbero essere adottate delle politiche che mirino a controllare il livello delle emissioni di gas serra.

In ultimo, un altro aspetto limitante di questo modello è imposto dalla natura stessa della materia in gioco, perché riguarda la riforestazione. Come possiamo notare nella figura 4 i benefici della riforestazione sono decrescenti principalmente a causa di due motivi: l'ampiezza territoriale e la meccanica del funzionamento dell'assorbimento di CO₂ da parte delle piante. Per quanto riguarda il primo motivo, bisogna fare riferimento allo spazio materialmente disponibile sulla Terra perché per sua natura geografica gli spazi verdi del pianeta sono finiti e sono stati in gran parte colonizzati dall'uomo, che li utilizza per vivere e per procurarsi i mezzi per il proprio sostentamento, come ad esempio i terreni destinati all'allevamenti e all'agricoltura. In secondo luogo, non tutte le aree verdi permettono lo stesso tipo di riforestazione perché il tipo di terreno e soprattutto il clima impongono dei limiti sulla tipologia di albero che si può piantare in una determinata area e da ciò deriva anche

un cambiamento significativo del livello di assorbimento di CO₂ perché ogni pianta ne assorbe un livello diverso. Ciò che invece risulterebbe più complicato è il problema della meccanica dell'assorbimento, perché le piante assimilano CO₂ solo durante la fase di crescita e una volta raggiunta la maturità vivono in equilibrio stazionario. La combinazione di questi due problemi spiega l'andamento decrescente dell'impatto dell'ottimizzazione degli incentivi sulla riforestazione.

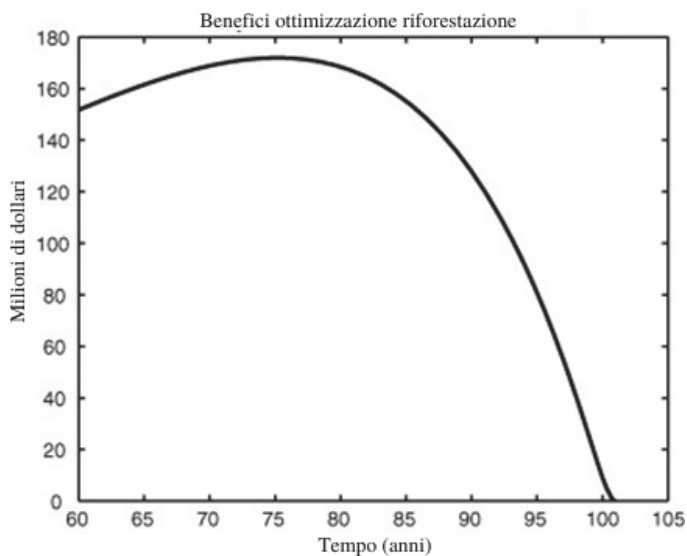


Figura 4: Grafico andamento dell'ottimizzazione degli incentivi sulla riforestazione nel tempo

Un altro problema, che non può essere considerato un limite, è la crescita della spesa per l'ottimizzazione della tecnologia green, che possiamo notare nella figura 5, perché è correlata alla crescita del PIL, che porta ad un aumento di consumo di energia pro capite e quindi anche ad un aumento delle emissioni di CO₂. L'aumento della spesa nelle tecnologie pulite si rivela quindi essenziale per poter abbattere la quantità di CO₂ presente nell'atmosfera.

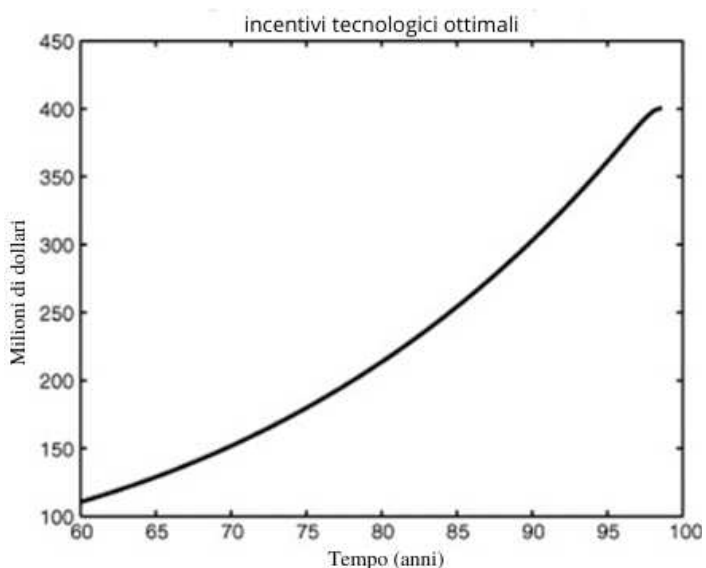


Figura 5: Grafico sull'andamento degli incentivi tecnologici ottimali nel tempo

Queste due immagini in realtà sono quasi complementari perché entrambe le ottimizzazioni lavorano insieme per contribuire alla riduzione dei gas serra e ognuna di esse perde di efficacia senza l'altra: sarebbe completamente inutile piantare più alberi se non venisse contemporaneamente implementata una tecnologia che riduce il livello di emissioni. Per questo Caetano, Gherardi e Yoneyama (2008) concludono la loro pubblicazione dicendo che la politica migliore sarebbe quella di iniziare ad investire nella riforestazione e gradualmente investire anche nelle tecnologie green, in modo tale da poter ridurre la quantità di gas serra già presenti nell'aria e allo stesso tempo emetterne sempre di meno. Questa conclusione riprende quanto è stato detto da Nordhaus (1993), il quale aveva intuito che vi era bisogno di trovare una nuova soluzione al problema e che avrebbe potuto rappresentare un cambio di prospettiva che avrebbe significato percorrere una strada parallela alla riduzione delle emissioni di gas serra e che portava all'assorbimento della CO₂ già presente nell'atmosfera. Queste conclusioni si sposano perfettamente con il percorso intrapreso dai vari stati che hanno aderito al Protocollo di Kyoto (1997), che prevedeva la riduzione delle emissioni di gas serra del 5% per il periodo 2008-2012, rispetto ai livelli del 1990, e soprattutto con gli SDG (Sustainable Development Goals) della Comunità Europea, ossia una lista composta da 17 obiettivi di sviluppo sostenibile da raggiungere a livello comunitario entro il 2030, tra i quali:

- Adottare misure urgenti per combattere il cambiamento climatico e i suoi impatti.
- Garantire modelli di consumo e produzione sostenibili.
- Garantire a tutti l'accesso ad un'energia affidabile, sostenibile, conveniente e moderna.
- Rafforzare i mezzi di attuazione e rivitalizzare il partenariato globale per lo sviluppo sostenibile.

Capitolo 3: Conclusione

In questo elaborato ci siamo occupati dei cambiamenti climatici e dei loro impatti economici sulla società, abbiamo mostrato che gli effetti di questi ultimi sono già da tempo visibili sul pianeta e che se non si prenderanno dei provvedimenti nell'immediato futuro si rischia che la situazione diventi irreversibile con conseguenze catastrofiche. Inoltre, abbiamo analizzato la letteratura sul tema, cercando di evidenziare come siano cresciute nel tempo la sensibilità e la preoccupazione della comunità economico-scientifica a riguardo, come si siano evoluti gli studi sulle possibili ripercussioni economiche e di come siano di conseguenza cambiate le previsioni degli studi.

Personalmente ritengo che il cambiamento climatico sia il principale problema che ci troveremo ad affrontare nel XXI secolo e per questo dovrebbe avere la priorità rispetto ad altre tematiche altrettanto importanti ma con impatti potenziali meno gravi e che potrebbero essere messe in secondo piano: se le previsioni sul cambiamento climatico si riveleranno corrette la società così come la conosciamo oggi subirà dei cambiamenti radicali, mettendo a repentaglio anche l'esistenza stessa dell'uomo. Per questo motivo, come ho avuto modo di osservare durante la stesura di questo elaborato, le tematiche, citate anche da Nordhaus (1993), come i salari, la disoccupazione, le competenze della forza lavoro o i fattori politici sono indubbiamente importanti e ricoprono un ruolo chiave nella società moderna, ma allo stesso tempo risultano secondarie se paragonate all'importanza del cambiamento climatico. Con questa considerazione non è mia intenzione dire che i governi mondiali dovrebbero smettere di interessarsi a queste problematiche per concentrarsi esclusivamente sui cambiamenti climatici perché, ovviamente, anche questa sarebbe una scelta estremista ed errata. Probabilmente, come accennato da Nordhaus (1993), lo sfasamento degli orizzonti temporali, di breve periodo per i governi e di lungo periodo per il cambiamento climatico, ha motivato la scelta di politiche ambientali più accomodanti che interventiste, perché queste ultime avrebbero comportato dei costi per i cittadini che, non percependo la tematica come prioritaria, non avrebbero apprezzato l'aumento delle tasse e di conseguenza il governo avrebbe perso consensi.

Da un punto di vista prettamente economico, il cambiamento climatico rappresenta anche un'opportunità per le aziende e per i singoli cittadini: può essere considerato a tutti gli effetti come il megatrend che caratterizzerà l'economia presente e futura in tutti i suoi livelli, quali scelte politiche, aziende e comportamenti dei singoli. Ritengo anche che la questione dei cambiamenti climatici possa rappresentare un'opportunità per i governi, perché nel cercare di risolvere la questione propongono principalmente delle soluzioni che risolvono implicitamente anche le questioni "secondarie" di cui prima ho accennato perché nei processi di adattamento, di tutti i livelli, ai cambiamenti climatici, il focus principale è quello di agevolare il processo di transizione da attività o comportamenti nocivi

per l'ambiente ad altri più "virtuosi". Nel far ciò i governi e le organizzazioni mondiali, come ad esempio l'Unione Europea, cercano sempre di proporre delle soluzioni ambivalenti che riescano a convogliare la risoluzione di più obiettivi allo stesso tempo. Un esempio potrebbero essere tutti i vari incentivi che vengono stanziati dai governi per favorire la transizione green, come ad esempio il progetto "REPowerEU" approvato dall'Unione Europea per favorire la transizione energetica dalle fonti non rinnovabili a quelle rinnovabili, o gli incentivi per l'acquisto di macchine elettriche o i bonus mobilità. Il duplice obiettivo, dichiarato dall'Unione Europea stessa, in questo caso è quello di combattere il cambiamento climatico, in primis, e agevolare la tra transizione energetica per diventare energeticamente più indipendenti e intraprendere un cammino che porti l'intera Europa ad avere un impatto pari a 0 sulle emissioni di CO₂.

I cambiamenti climatici rappresentano una potenziale opportunità anche per le aziende, perché a seguito dell'aumento della sensibilità ecologia della popolazione, quello che applicano i principi green al loro interno, e che riescono a comunicarlo nel modo giusto ai clienti, riescono ad aumentare i loro profitti. Inoltre, anche qui c'è una duplice ragione perché da un lato le aziende tengono ad abbassare la loro impronta ecologica, mentre dall'altro lo scopo principale della maggior parte delle aziende è la persecuzione del profitto; così facendo si innesca un circolo virtuoso che permette alle aziende di abbassare il loro peso ambientale, o addirittura avere anche un impatto positivo, attraendo più clienti e quindi aumentando il loro profitto. Perdipiù le aziende sono anche portate ad adottare atteggiamenti più green al loro interno perché, proprio in funzione del circolo virtuoso descritto precedentemente, le aziende che non lo fanno rischiano di restare tagliate fuori da mercato.

I cambiamenti climatici possono rappresentare un'opportunità anche per i singoli cittadini, perché ad esempio nel mondo della finanza, a seguito della richiesta crescente dei singoli investitori di colere all'interno del loro portafoglio aziende e indici che rispecchiassero i loro valori, è nato il concetto di "Finanza sostenibile" il quale ha portato alla creazione di strumenti finanziari sostenibili, gli ESG, e di indici di sostenibilità che valutano le principali aziende quotate in borsa e i vari strumenti finanziati per il loro impatto ambientale.

In conclusione credo che indubbiamente il cambiamento climatico rappresenti il pericolo più grande, per possibili conseguenze e per estensione geografica, che l'uomo si sia mai trovato ad affrontare nella sua storia, ma che allo stesso tempo, grazie allo sforzo della comunità economico-scientifica, i governi mondiali abbiano a disposizione i mezzi adeguati per poter evitare gli scenari di previsione peggiori. Siglando l'accordo di Parigi, 197 paesi si sono impegnati a voler mantenere l'aumento delle temperature al di sotto dei 2°C rispetto alle temperature pre-industriali, e se questo obiettivo verrà raggiunto l'equilibrio globale verrà ripristinato, anche se ci vorranno secoli prima che questo accada.

Indubbiamente, resta poco tempo per evitare che il cambiamento climatico diventi irreversibile e che si verifichino le previsioni discusse nel corso di questo elaborato, ma ritengo che personalità di spicco come Nordhaus, Cline, Fankhauser e molti altri con i loro lavori abbiano contribuito a sensibilizzare i governi e la popolazione alla tematica dei cambiamenti climatici, fornendo non solo delle analisi sui probabili impatti ma suggerendo anche le possibili soluzioni da adottare in merito.

Bibliografia

- Bahinipati C.S., 2011. *Economics of Adaptation to Climate Change: Learning from Impact and Vulnerability Literature*. Madras Institute of Development Studies (MIDS) Working Paper No. 213.
- Beyer R.M., Manica A., Mora C., 2021. *Shifts in global bat diversity suggest a possible role of climate change in the emergence of SARS-CoV-1 and SARS-CoV-2*. *Science of The Total Environment*, Volume 767.
- Caetano M.A.L., Gherardi D.F.M., Yoneyama T., 2008. *Optimal resource management control for CO2 emission and reduction of the greenhouse effect*, *Ecological Modelling*, Volume 213, Issue 1; 119-126.
- Cline W.R., 1992. *Economics of Global Warming*. Peterson Institute Press: All Books , Peterson Institute for International Economics, number 39.
- Di Ubaldo, M., McGuire, S. & Shirodkar, V., 2022. *Voluntary programs and emissions revisited: What is the effect of EU trade agreements with environmental provisions?*. *J Int Bus Policy*.
- Druen, Perri B., and Zawadzki S.J., 2021. *Escaping the Climate Trap: Participation in a Climate-Specific Social Dilemma Simulation Boosts Climate-Protective Motivation and Actions* *Sustainability* 13, no. 16: 9438.
- Fankhauser S., 1993. *Evaluating the social costs of greenhouse gas emissions*. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, University of East Anglia.
- Hickel J., 2018. *Why growth can't be green*. *Australian Options* 89: 12-13.
- Hubau W., Lewis S.L., Phillips O.L. et al., 2020. *Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests*. *Nature* 579, 80–87.
- Ingels, J, Aronson, RB, Smith, CR, et al., 2021. *Antarctic ecosystem responses following ice-shelf collapse and iceberg calving: Science review and future research*. *WIREs Clim Change* 12:e68.
- Keen S., 2022. *Why system dynamics must supplant equilibrium modelling*. *Book of Abstracts*. 2020.
- Lestienne, M., Vannière, B., Curt, T. et al. *Climate-driven Mediterranean fire hazard assessments for 2020–2100 on the light of past millennial variability*. *Climatic Change* 170, 14.
- Masini F., 2021. *William Nordhaus: A disputable Nobel [Prize]? Externalities, climate change, and governmental action*, *The European Journal of the History of Economic Thought*, 28:6, 985-1004.

- Nordhaus W.D., 1991. *To Slow or Not to Slow: The Economics of The Greenhouse Effect*. The Economic Journal 101, no. 407: 920–37.
- Nordhaus W.D., 1993. *Reflections on the Economics of Climate Change*. Journal of Economic Perspectives, 7 (4): 11-25.
- Reilly J. and Hohmann N., 1993. *Climate Change and Agriculture: The Role of International Trade*. The American Economic Review 83, no. 2: 306–12.
- Stern N., 2006. *Stern review: The economics of climate change*. UK.
- Stollery K. R., 1998. *Constant utility paths and irreversible global warming*. Canadian Journal of Economics : 730-742.