



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY "A. RIGHI"

SECOND CYCLE DEGREE

PHYSICS

**SCIENZA, INCERTEZZA E GIUSTIZIA
CLIMATICA: RIFLESSIONI EPISTEMOLOGICHE
E IMPLICAZIONI PER L'EDUCAZIONE
CONTEMPORANEA**

Supervisor
Prof.ssa Olivia Levrini

Defended by
Marco Calvaresi

Co-Supervisor
Dott. Lorenzo Miani

Graduation Session / December/ 2025
Academic Year 2024/2025

Abstract

Il cambiamento climatico mette in crisi sia gli equilibri fisici del sistema Terra che i modi in cui produciamo, comunichiamo e insegniamo conoscenza scientifica. Questa tesi esplora l'incertezza come elemento strutturale della scienza del clima e come risorsa educativa per una cittadinanza capace di orientarsi in condizioni di rischio e giustizia climatica.

Il lavoro si articola lungo quattro domande di ricerca, che riguardano: 1) le difficoltà intrinseche nella rappresentazione modellistica del clima e la tensione tra affidabilità e informatività; 2) le modalità con cui incertezza e rischio vengono gestite e comunicate attraverso il lavoro dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); 3) le sfide del trasferimento di conoscenza dai prodotti e metodi dell'IPCC alle pratiche educative nel campo della didattica delle scienze; 4) la possibilità di formulare principi operativi per comunicare e insegnare l'incertezza rafforzando l'integrità dell'informazione.

Metodologicamente, la tesi combina analisi concettuale sui modelli, rilettura critica del framework IPCC, rassegna di ricerche in didattica delle scienze e un focus group con cinque studenti di un corso magistrale in didattica della fisica, inserito nel percorso europeo SIG-8 dell'ESERA.

Dall'intreccio di questi piani emergono cinque principi operativi che usano modelli e scenari come supporto per discutere l'incertezza. Gli esiti del focus group, letti alla luce degli studi su *wicked problems* e *storyline*, mostrano che la didattica dell'incertezza non consiste nel togliere complessità, ma si possono trasformare problemi come il cambiamento climatico in trame narrative e spazi di decisione in cui gli studenti possano confrontare scenari, riconoscere diversi tipi di incertezza, argomentare sul grado di precauzione e collegare dati, valori e giustizia climatica. L'incertezza emerge così non come difetto da eliminare, ma come competenza cruciale per abitare in modo critico e responsabile il presente climatico.

Sommario

Introduzione	1
Capitolo 1 - Stato dell'arte e quadro concettuale	6
1.1 Ruolo dei modelli nella comunicazione dei cambiamenti climatici.....	11
1.2 Domande di ricerca	16
Capitolo 2 - Incertezza nei modelli scientifici e nei modelli climatici.....	18
2.1 Costruzione di un modello climatico	22
2.2 Incertezze nella scienza del clima	34
Capitolo 3 - Incertezza come oggetto di riflessione all'interno dell'IPCC.....	39
3.1 Il framework dell'IPCC per l'incertezza nei rapporti sul clima	40
3.1.2 Criticità filosofiche ed epistemologiche del framework IPCC	47
3.2 Dalla scienza ai decisori: interpretazione e comunicazione dell'incertezza	53
3.3 Rischio e incertezza: quadri teorici oltre l'approccio IPCC	58
Capitolo 4 - L'incertezza scientifica nella didattica delle scienze	61
4.1 Il vissuto dell'incertezza da parte degli studenti	62
4.2 Strategie didattiche per affrontare l'incertezza	65
4.2.1 Argomentazione scientifica e gestione dell'incertezza	65
4.2.2 Approcci storyline e problemi complessi	67
4.2.3 Ragionamento probabilistico e approccio bayesiano	73
4.3 Implicazioni per l'educazione scientifica e la cittadinanza scientifica	76
Capitolo 5 - Incertezza nel cambiamento climatico studiata dal punto di vista di studenti di Fisica	79
5.1 Focus group	83
Introduzione al lavoro	85
5.1.1 Task 1.....	87
5.1.2 Commento e discussione del TASK 1.....	91
5.1.3 Check intermedio.....	93
5.1.4 Task 2.....	93
5.1.5 Commento e discussione del Task 2	97
5.1.6 Check finale.....	99
5.2 Nuovi obiettivi e raccomandazioni	100
5.3 Principi operativi per comunicare ed educare all'incertezza.....	102
5.3.1 Commento sui principi	108
Conclusione	111
Aspetti critici della tesi	113
Ulteriori sviluppi per la tesi.....	115
References	117

Introduzione

Il cambiamento climatico è una delle sfide più pressanti del nostro tempo. Come sottolineato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) – il principale organismo internazionale per la valutazione della scienza del clima – gli effetti delle attività antropiche, come l'uso massiccio di combustibili fossili, la deforestazione e le emissioni di gas serra, stanno alterando profondamente il sistema climatico terrestre, con la temperatura superficiale globale pari a $\sim 1,1$ °C sopra il 1850-1900 nel 2011-2020 (IPCC, 2023). Sempre per l'IPCC, gli impatti derivanti dall'innalzamento delle temperature, dall'incremento di eventi estremi e dallo scioglimento dei ghiacci producono conseguenze di rilievo sia per gli ecosistemi (ad esempio il collasso delle barriere coralline) che per le società umane (maggiore mortalità e morbilità legate al caldo, peggioramento della sicurezza alimentare e idrica, e rischi crescenti per insediamenti e infrastrutture costiere dovuti all'innalzamento del livello del mare ormai inevitabile) (IPCC, 2023).

Il tipo di impatto che questi cambiamenti apportano e apporteranno al nostro ecosistema ambientale e sociale è difficilmente misurabile. Ciononostante, è importante focalizzarsi su come i cambiamenti climatici stanno modificando il modo con cui ci relazioniamo con il mondo e con la scienza.

La presente ricerca si colloca quindi all'intersezione tra tre urgenze legate a questi temi: la gravità della crisi climatica, la crisi dell'integrità informativa che la circonda e la necessità di un'educazione scientifica capace di trattare le incertezze derivanti dal problema in modo esplicito, contestualizzato e culturalmente sensibile.

Sul primo fronte, l'urgenza non deriva da un unico dato ma dalla convergenza di più linee di evidenza. Il superamento, per la prima volta, della media di 1,5 °C sui dodici mesi febbraio 2023–gennaio 2024 (Copernicus Climate Change Service, 2024) va letto come sintomo di un trend più ampio, in cui l'IPCC evidenzia che a ogni incremento di riscaldamento i rischi, le perdite e i danni crescono, e molti rischi sono oggi più alti rispetto alle valutazioni precedenti (IPCC, 2023). Inoltre, l'innalzamento del livello del mare e altre trasformazioni irreversibili proseguiranno per migliaia di anni con velocità dipendente dalle emissioni future (IPCC, 2023); e anche un superamento temporaneo di 1,5 °C comporta rischi aggiuntivi per sistemi naturali e umani, alcuni dei quali irreversibili, mentre si osservano già limiti all'adattamento in ecosistemi tropicali, costieri, polari e montani.

In parallelo, la cornice dei *planetary boundaries* suggerisce che l'urgenza è sistemica e non solo climatica: l'aggiornamento del 2025 indica che 7 confini sui 9 valutati risultano oggi oltrepassati (tra cui clima, integrità della biosfera, uso del suolo, etc.), con rischi crescenti di cambiamenti su larga scala, potenzialmente improvvisi o irreversibili (Sakschewski & Caesar et al., 2025).

Sul secondo fronte, l'ecosistema informativo è attraversato da pratiche che compromettono l'integrità dell'informazione climatica. Finanziamenti opachi hanno

sostenuto nel tempo il “*climate change countermovement*”, con una quota rilevante di fondi non tracciabili e un ruolo centrale di alcune grandi fondazioni, come documentato da analisi su dati dell’Internal Revenue Service (IRS), l’agenzia federale delle entrate degli Stati Uniti e del Foundation Center (Brulle, 2013). La “*false balance*” giornalistica ha storicamente distorto la copertura mediatica, equiparando posizioni minoritarie e consenso scientifico e generando divergenza tra discorso pubblico e letteratura scientifica (Boykoff & Boykoff, 2004). Tattiche di ostruzione e rinvio spostano l’attenzione, giustificano l’inazione o chiedono che agiscano “altri/più tardi”, contribuendo allo stallo politico (Lamb et al., 2020). Questo non è solo un problema di qualità dei contenuti, ma di architettura dei media e politica della comunicazione.

In questo quadro, l’importanza dell’educazione è un aspetto fondamentale su cui concentrarsi. Come sottolinea l’International Panel on the Information Environment (IPIE) – organismo scientifico indipendente con sede in Svizzera che coordina panel internazionali di esperti per valutare le minacce all’ambiente informativo globale – “l’educazione costituisce una strategia ampia e di lungo periodo per permettere alle persone di accedere, elaborare e applicare informazioni sul cambiamento climatico” (IPIE, 2025, p. 100), sviluppando insieme alfabetizzazione scientifica e media literacy per fronteggiare sia la crisi informativa che quella climatica.

L’incertezza non è trattata come un difetto da attenuare, ma come componente strutturale della conoscenza climatica e come competenza da apprendere; migliorare la comunicazione e l’educazione dell’incertezza non significa semplificare il problema del cambiamento climatico, bensì renderlo maneggiabile attraverso attività che ancorano l’incertezza a contesti di vita, la scompongono nelle sue dimensioni e la attraversano con lenti plurali. Sul piano scientifico, l’incertezza riguarda il modo in cui i modelli rappresentano il sistema: scelte di parametrizzazione, accoppiamenti tra sottosistemi e limiti dei dati producono intervalli, livelli di confidenza e scenari alternativi che vanno compresi per ciò che dicono e per ciò che non possono dire. Sul piano decisionale, l’incertezza entra nei vincoli di tempo e nella gestione di rischi asimmetrici, inclusi esiti a bassa probabilità ma ad alto impatto, richiedendo strumenti comunicativi che rendano trasparenti ipotesi, limiti e conseguenze operative (dal linguaggio probabilistico a narrazioni fisicamente coerenti orientate al “che cosa succede se...”). Sul piano educativo, infine, si apre un salto di traduzione tra comunità esperte e studenti: alfabetismo probabilistico, lettura di grafici e distinzione tra variabilità, ignoranza e disaccordo sono prerequisiti per non scambiare gli intervalli per “errore” o l’incertezza per indecisione. In questo quadro, l’incertezza diventa un oggetto-ponte tra modellizzazione, comunicazione e didattica, e orienta lo sviluppo di principi operativi su quando privilegiare probabilità e intervalli, quando ricorrere a storylines coerenti con la fisica, e come rendere visibili le assunzioni dei modelli senza oscurarne la forza esplicativa.

L'IPIE si è concentrata sull'analisi critica dell'integrità dell'informazione climatica a livello globale, e numerose evidenze emerse dalla letteratura sintetizzata nello studio (Elbeyi et al, 2025) suggeriscono che la comunicazione efficace del cambiamento climatico dipende in modo cruciale da come l'informazione è incorniciata, dalle emozioni che evoca e dal grado in cui riesce a risuonare con contesti e vissuti locali. In particolare, la nozione di distanza psicologica — derivata dalla Construal Level Theory (Trope & Liberman, 2010) — offre un quadro interpretativo chiave per comprendere il disingaggio del pubblico: se il cambiamento climatico è percepito come lontano nel tempo, nello spazio o rilevante per "altri", la risposta cognitiva ed emotiva tende a essere attenuata. Una ricerca in didattica delle scienze nell'ambito dei cambiamenti climatici (Miani & Levrini, 2024) mostra che strategie comunicative e didattiche centrate su narrazioni localizzate, casi concreti e testimonianze personali possono ridurre questa distanza, facilitando una rielaborazione più situata e motivante del problema. A patto che il linguaggio resti accessibile, bilanciato e orientato all'azione, tali approcci possono aumentare la rilevanza percepita e sostenere forme di agency, in particolare nei giovani. Questa prospettiva rafforza l'enfasi, assunta in questa tesi, sulla contestualità: ciò che si comunica sull'incertezza va intrecciato con il "per chi", il "dove" e il "con quali valori" si comunica.

Il quadro entro cui situare questo lavoro è quello tracciato dall'AR6 Synthesis Report, usato qui come bussola perché integra in modo coerente i risultati dei tre Working Group e codifica il linguaggio calibrato con cui l'IPCC pesa evidenze e probabilità (*confidence* e *likelihood*) per collegare basi fisiche, impatti, rischi e opzioni di risposta (IPCC, 2021). Per un'educazione all'incertezza, ciò implica mettere gli studenti nelle condizioni di leggere figure (Gardner et al., 2024), intervalli e livelli di confidenza (Lee et al., 2020; Rosenberg et al., 2022) come strumenti di ragionamento e non come formule da memorizzare. Infatti, sul versante educativo, una letteratura ormai solida (ad esempio Covitt & Anderson, 2022) mostra che l'incertezza può e deve essere oggetto di apprendimento: trattarla esplicitamente accresce la fiducia ben informata nella scienza, chiarisce la differenza tra affidabilità delle conclusioni e loro revisione nel tempo, e offre pratiche didattiche concrete. In particolare, lavori in didattica delle scienze documentano strategie per lavorare in modo produttivo con l'incertezza: argomentazione (Chen et al., 2019), ragionamento probabilistico (Rosenberg et al., 2022), anche con approcci bayesiani accessibili, e uso di storyline educative (Miani & Levrini, 2024) allenano gli studenti a navigare scenari e vincoli reali. In questo senso, leggere grafici, bande d'incertezza e livelli di confidenza non è un esercizio di traduzione tecnica, ma un modo di pensare con i modelli: una competenza che sostiene tanto la comprensione dei processi fisici quanto la discussione informata di rischi e opzioni di azione.

In particolare, la tesi si articola in cinque capitoli:

Il primo capitolo posiziona la tesi nel filone di ricerca della *science education*, presentando lo stato dell'arte della ricerca in didattica della fisica e della comunicazione scientifica rispetto al tema dell'incertezza nei cambiamenti climatici. In particolare, mi concentrerò sul presentare gli studi di settore che analizzano i modi in cui questa viene gestita e presentata in ambito didattico e comunicativo. Partendo da questa descrizione alla fine del capitolo delineerò le domande di ricerca che hanno guidato il lavoro di tesi.

Il secondo capitolo si concentra sui modi con cui l'incertezza influenza la struttura dei modelli scientifici, partendo da una panoramica sulla natura dei modelli e distinguendone i diversi ruoli e usi. Nel fare questo, nel capitolo si introduce una prima differenziazione del concetto di incertezza, separando tra incertezza epistemica (legata alla conoscenza) e aleatoria (legata alla intrinseca complessità della natura). Nel contesto climatico, ciò si traduce nel riconoscere che i modelli incorporano scelte metodologiche e semplificazioni, producendo conoscenza robusta ma sempre situata rispetto a scopi e scale d'analisi. La chiusura del capitolo mette in luce l'implicazione comunicativa: una cittadinanza scientifica matura deve saper distinguere tra “non sappiamo tutto” e “non sappiamo nulla”, evitando l'equivoco che equipara incertezza a ignoranza o disaccordo totale. Questa descrizione prepara il terreno per spostare lo sguardo dal piano strettamente modellistico a quello socio-istituzionale.

Il terzo capitolo si concentra sugli aspetti di comunicazione della scienza nel caso delle incertezze scientifiche legate al clima. In particolare, affronta l'incertezza come oggetto di riflessione all'interno dell'IPCC. Il capitolo parte da una descrizione dettagliata delle scelte e dei processi che hanno portato alla stesura del sesto Assessment Report dell'IPCC (AR6) (IPCC, 2021). Il report viene scelto come modello di riferimento poiché definisce, in maniera precisa e strutturata, il modo con cui i membri dell'IPCC hanno combinato valutazioni qualitative di *confidence* e stime quantitative di *likelihood* (Mastrandrea et al., 2010). Il report, nella sua forma Synthesis pensata per i decisori politici, offre informazioni ben definite e tracciabili sui rischi climatici e sul grado di certezza con cui questi sono conosciuti. Il capitolo discute quindi alcune criticità del report da una prospettiva filosofica: relazione tra evidenza e accordo, rapporto tra *confidence* e *likelihood*, e assenza di un modello teorico unificato per l'aggregazione delle evidenze. Inoltre, ci si concentra su alcuni nodi comunicativi legati alla ricezione dei termini probabilistici da parte di un pubblico non esperto. Nella parte finale del capitolo vengono presentati alcuni suggerimenti per affrontare queste criticità, evidenziando come alcune scelte linguistiche e/o visuali possano abilitare o ostacolare interpretazioni adeguate.

Il quarto capitolo si concentra sull'incertezza nella didattica della fisica, esplorando in maniera dettagliata come l'incertezza scientifica viene vissuta dagli studenti. Il

capitolo cerca di esplorare le strategie attraverso cui rendere l'incertezza una risorsa per il ragionamento scientifico, anziché ostacolo. Per fare ciò, il capitolo integra tre linee: il vissuto e le mispractice più frequenti, come ad esempio la riduzione dell'incertezza al solo errore sperimentale; le strategie didattiche come l'argomentazione basata su evidenze, l'uso di storyline e problemi complessi, e la coltivazione del ragionamento probabilistico (anche in chiave bayesiana); le implicazioni per la cittadinanza scientifica, in coerenza con cornici internazionali che includono la gestione di complessità e incertezza tra le competenze chiave per i futuri cittadini.

Il quinto e ultimo capitolo documenta la progettazione, conduzione e analisi di un focus group, svolto in collaborazione con il gruppo di ricerca in Didattica della Fisica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna. Il focus group è stato realizzato con l'obiettivo di rifinire un'attività di esplorazione sul rapporto certezza-incertezza, implementata poi all'interno dello Special Interest Group 8 (SIG8) della comunità di ricerca europea ESERA nell'agosto del 2025. L'obiettivo dell'attività è di far emergere priorità e raccomandazioni su come comunicare e insegnare la tensione "certezze-incertezze".

Nella prima parte del capitolo descrivo i task specifici di lettura, valutazione e riscrittura guidata di tre raccomandazioni specifiche sviluppate all'interno del SIG8 nello scorso anno sulla tensione certezza-incertezza, con momenti di confronto intermedi e finali. Nel descrivere questi task mi avvarò di riferimenti e citazioni alle opinioni dirette dei partecipanti del focus group, ovvero 5 studenti del corso magistrale di Didattica e Storia della Fisica.

Infine, a partire da questo confronto, vengono presentati alcuni principi operativi su come poter gestire in maniera consapevole la tensione concettuale in ambito educativo e comunicativo.

Sul piano metodologico, il lavoro combina l'analisi concettuale e la ricostruzione di cornici teorico-istituzionali (Cap. 2–3), la rassegna e la messa a sistema di pratiche didattiche per l'educazione scientifica all'incertezza (Cap. 4), e l'indagine qualitativa tramite focus group su studenti di Fisica (Cap. 5).

Capitolo 1 - Stato dell'arte e quadro concettuale

Il primo capitolo posiziona la tesi nel filone di ricerca della *science education*, presentando lo stato dell'arte della ricerca in didattica della fisica e della comunicazione scientifica rispetto al tema dell'incertezza nei cambiamenti climatici. In particolare, mi concentrerò sul presentare gli studi di settore che analizzano i modi in cui questa viene gestita e presentata in ambito didattico e comunicativo. Partendo da questa descrizione alla fine del capitolo delineerò le domande di ricerca che hanno guidato il lavoro di tesi.

La scienza del clima affronta fenomeni intrinsecamente complessi e caotici, per cui lavorare con l'incertezza è inevitabile. In particolare, si riconoscono tre fonti principali di incertezza nelle proiezioni climatiche future: l'incertezza aleatoria o di variabilità naturale – inerente alla variabilità intrinseca del clima; l'incertezza sulle forzanti future – legata alle scelte socio-economiche e alle emissioni (spesso detta incertezza di scenario o riflessiva, poiché dipende dalle decisioni umane in divenire); l'incertezza sulla risposta del sistema climatico – dovuta a limiti nelle conoscenze e nei modelli, cioè incertezza epistemica (es. comprensione incompleta dei processi di feedback, variabilità interna del clima, ecc.). Alcuni studi classici hanno formalizzato queste categorie (ad es. Dessai & Hulme, 2004; Shepherd, 2019) e oggi anche l'IPCC le adotta per analizzare la fiducia nelle previsioni.

Di fronte a tali incertezze, la comunità scientifica ha sviluppato approcci per quantificarle e comunicarle. L'IPCC, nei suoi rapporti, impiega un linguaggio calibrato di probabilità (es. *likely*, *very likely*, ecc.) e di livelli di confidence, basato su linee guida concordate (Mastrandrea et al., 2010). Questo sforzo di normalizzazione riflette la rilevanza data all'incertezza: invece di ignorarla, la si rappresenta esplicitamente per supportare decisioni informate (IPCC, 2023). In effetti, l'incertezza climatica è oggi un tema di ricerca cruciale proprio perché dobbiamo prendere decisioni urgenti e di grande portata (in primis mitigazione e adattamento) nonostante conoscenze imperfette. In tale contesto “post-normale” (Funtowicz & Ravetz, 1993), quando i fatti sono incerti, i valori in gioco elevati e le decisioni urgenti, l'incertezza scientifica, da semplice parametro tecnico, diventa un problema sociale e politico. Funtowicz e Ravetz sottolineano che l'incertezza, di per sé parte naturale del progresso scientifico, diventa problematica solo quando la politica richiede risposte chiare e univoche dalla scienza per legittimare l'azione. Ciò descrive esattamente la sfida del cambiamento climatico odierno: la scienza può quantificare rischi e probabilità, ma non eliminare del tutto l'incertezza, mentre i decisori e la società richiedono risultati esatti nel presente e nel futuro per agire. Questa tensione rende l'incertezza climatica un tema di ricerca rilevante, il che ha motivato negli ultimi anni una crescente ricerca per approcci innovativi sia nella

scienza del clima (ad es. metodi Bayesiani) che nelle scienze sociali (ad es. analisi di scenari *what-if*) per gestire l'interfaccia scienza-politica.

In generale, comunicare l'incertezza scientifica al pubblico costituisce una sfida delicata: da un lato, la comunità scientifica intende mantenere accuratezza e trasparenza riguardo ai limiti delle conoscenze; dall'altro, il pubblico può percepire tali ammissioni di incertezza come indice di inaffidabilità o mancanza di consenso. Di recente diversi lavori provenienti da ambiti differenti hanno evidenziato alcune problematiche comunicative in questo ambito: ad esempio Budescu e colleghi (2009), interrogando un gruppo di 223 tra studenti e non esperti, hanno mostrato come spesso i termini probabilistici usati all'interno dei report IPCC facenti parte dell'AR4 possano essere fraintesi. Ad esempio, espressioni come "*likely*" o "*very likely*" nei report IPCC vengono interpretate dal pubblico con probabilità molto diverse da quelle intese dagli scienziati, generando confusione e sottostima dei rischi reali. Analogamente, Corbett e Durfee (2004), in uno studio mirato ad analizzare il ruolo che controversie e contesto specifico possono avere nella comprensione di fenomeni climatici segnati da alti livelli di incertezza, hanno trovato che gli articoli giornalistici che enfatizzano l'incertezza possono indurre i lettori a sentirsi meno sicuri sulle conclusioni scientifiche. In un altro studio mirato a studiare la reazione rispetto all'incertezza nella comunicazione dei cambiamenti climatici, Ballard e Lewandowsky (2015) hanno mostrato come la presentazione di informazioni caratterizzate da incertezza sull'esito ma non sul quando dell'avvenimento porta ad una sottostima del rischio, apendo spazi al *wishful thinking*, mentre gestire dati certi con distribuzione temporale incerta diminuisce questi comportamenti. Questo tipo di analisi mostra come la presenza di bias interni sulla natura dell'incertezza dei cambiamenti climatici possa portare un pubblico mediamente non formato sul tema a mettere in dubbio la gravità del problema. In sintesi, proporre immagini di scienza esatta senza presentare nel dettaglio l'incertezza intrinseca che caratterizza il processo scientifico (Kampourakis & McCain, 2019) rischia di alimentare fenomeni di scetticismo piuttosto che di comprensione, nel momento in cui diventa necessario gestire informazioni presentate con alti livelli di incertezza.

Inoltre, la rilevanza attuale dell'incertezza è accentuata dal fatto che viene spesso strumentalizzata nel dibattito pubblico, dove alcuni media e gruppi negazionisti sfruttano l'incertezza per creare false narrazioni: Michaels (2008) descrive come "fabbricare incertezza" sia diventato un metodo per contestare evidenze scientifiche scomode, dall'ambiente alla salute pubblica; Oreskes e Conway (2010) hanno mostrato che anche nel contesto del cambiamento climatico alcuni scienziati contrari, finanziati da lobby, hanno amplificato i margini di incertezza dei modelli climatici per mettere in discussione la realtà del riscaldamento globale. Il rapporto IPIE (Elbeyi et al., 2025) – una revisione di 300 studi sull'informazione climatica – documenta che attori organizzati (think tank, politici, corporazioni) orchestrano campagne narrative che minano l'integrità dell'informazione sul clima, spostando

l'attenzione dall'evidenza scientifica a controversie artificiali. Per esempio, negli anni recenti, alcuni gruppi conservatori hanno abbandonato la strategia di dire che “la scienza è incerta” per passare ad attacchi personali agli scienziati, cercando di delegittimarli (Cann & Raymond, 2018); altri, invece, enfatizzano aspetti economici (costi delle politiche climatiche) per distogliere dall'urgenza ambientale. Il risultato, evidenziato dall'IPIE, è un calo di fiducia nella scienza, una polarizzazione dell'opinione pubblica e un ritardo nell'azione politica. In particolare, la diffusione di disinformazione ed emozioni negative (es. teorie del complotto su “bufale climatiche”) alimenta un circolo vizioso tra negazionismo scientifico e inazione politica. Questa crisi dell'integrità informativa attorno al clima rende ancora più difficile comunicare in modo efficace l'incertezza intrinseca al processo di analisi e studio del clima. Quindi, comprendere la natura dell'incertezza e comunicarla correttamente è oggi essenziale per impedire che il dubbio venga utilizzato come arma di disinformazione, grazie a narrazioni semplicistiche che possono avere un grande impatto dal punto di vista emotivo.

Alla luce di ciò, emergono raccomandazioni su come trattare l'incertezza nella comunicazione scientifica. Un approccio è contestualizzare l'incertezza, spiegando che essa non implica ignoranza totale, ma un intervallo quantificato di possibili esiti. Ad esempio, alcuni studiosi (Teigen et al., 2022) suggeriscono di usare analogie con ambiti familiari: dire che una proiezione climatica ha, poniamo, il 90% di probabilità di verificarsi è analogo a situazioni quotidiane in cui agiamo comunque senza certezza assoluta, come portare l'ombrelllo con il 90% di pioggia prevista. Un'altra strategia, utilizzata dall'IPCC, è esplicitare la fonte dell'incertezza distinguendo fra variabilità interna, incertezze di modello (risposta del clima) e incertezze di scenario (legate a futuri socio-economici alternativi); queste ultime sono esplorate tramite set di scenari che includono anche percorsi di mitigazione verso la *carbon neutrality*, evidenziando come la loro riduzione dipenda da decisioni politiche e scelte collettive (IPCC, 2021). Cruciale è anche enfatizzare ciò su cui c'è consenso: ad esempio, che il riscaldamento globale è inequivocabile e di origine antropica (alto grado di certezza), mentre c'è maggiore incertezza su quanto esattamente aumenteranno le temperature sotto diversi scenari di emissione. Studi come quello di Lloyd e Oreskes (2021) propongono un cambiamento nella soglia di comunicazione, notando che gli scienziati climatici tendono a essere troppo cauti nel dichiarare conclusioni (richiedono spesso più del 95% di probabilità per affermare un effetto), mentre in ambito legale o decisionale ([Cornell Law School](#)) si considera sufficiente una probabilità maggiore del 50%. Secondo le autrici, allineare la soglia probatoria scientifica a quella legale nei rapporti IPCC potrebbe rendere i messaggi più chiari per i policy-maker e l'opinione pubblica, senza attendere livelli di certezza inarrivabili (Lloyd e Oreskes, 2021). In sostanza, bilanciare rigore e rilevanza pratica è fondamentale: comunicare l'incertezza in modo onesto, né allarmista né eccessivamente tecnico, collegandola ai rischi concreti e alle azioni possibili, può aiutare il pubblico a comprendere che “incerto” non significa “non succederà”, ma

piuttosto implica una gamma di esiti possibili da gestire con un approccio precauzionale.

Dal punto di vista della didattica, l'incertezza rappresenta al contempo una sfida e un'opportunità educativa. Tradizionalmente, l'insegnamento scientifico a livello scolastico tende a presentare teorie ed esperimenti come sequenze ordinate che portano a risultati certi, semplificando o ignorando il ruolo dell'incertezza nella pratica scientifica. Kirch (2010) osservava che raramente si trasmette agli studenti un apprezzamento dell'elemento di incertezza nella conoscenza scientifica. Allo stesso modo, Chen e colleghi (2019) notano che le scuole offrono poche occasioni per esperienze dirette di gestione dell'incertezza: gli studenti apprendono nozioni consolidate, ma non come tali conoscenze siano state ottenute attraverso dati con errori, ipotesi in competizione e revisione tra pari. Ciò può dare l'illusione che la scienza abbia sempre ragione in modo assoluto, oppure – per contrasto – quando nella realtà vedono dibattiti tra scienziati, gli studenti possono perdere fiducia nella scienza perché non sono abituati all'idea che il dissenso e l'incertezza siano parte del processo scientifico.

Le problematiche educative derivanti da questa impostazione sono dupli: da un lato, i membri della società di domani potrebbero non saper valutare correttamente affermazioni scientifiche in condizioni di incertezza (es. proiezioni climatiche con scenari multipli); dall'altro, manca lo sviluppo delle competenze di pensiero critico necessarie per affrontare problemi complessi e incerti come il clima. La recente pandemia di COVID-19 lo ha illustrato bene: di fronte a un evento ad alta incertezza e rischio, gran parte della popolazione – inclusi decisori con formazione tecnico-scientifica – ha mostrato difficoltà nel gestire informazioni incerte e nel prendere decisioni razionali bilanciando probabilità e conseguenze (Pietrocola et al., 2021). Pietrocola e colleghi collegano questo anche al fatto che abbiamo formato studenti a risolvere problemi chiusi e ben definiti, ma non a navigare in scenari incerti e ambigui. In un'ottica di sviluppo della *scientific literacy*, ciò è preoccupante: nell'odierna "società del rischio" (Beck, 1992) è necessario affrontare quotidianamente scelte su questioni come vaccini, energia nucleare e cambiamenti climatici, tutte caratterizzate da rischi probabilistici e incertezze. Se la scuola non prepara a comprendere concetti come margine di errore, intervallo di confidenza e probabilità condizionata, esiste la possibilità di lasciare la società esposta a paure irrazionali o, all'opposto, a una sottovalutazione di pericoli reali.

La recente ricerca in didattica delle scienze, però, offre nuove prospettive su come integrare l'incertezza nell'insegnamento della scienza in modo proficuo. Un filone di studi (ad es., Allchin, 2012; Osborne et al., 2003) sostiene l'importanza di insegnare la natura della scienza, evidenziando che il sapere scientifico è in evoluzione e soggetto a revisione. In particolare, Chen e colleghi (2019) hanno documentato, attraverso osservazioni in classe, che i docenti possono creare momenti produttivi di incertezza durante le discussioni scientifiche (argomentazione). Nel loro studio su

due classi di scuola media, quando gli insegnanti sollevavano domande la cui risposta non era univoca o evidenziavano incoerenze nelle spiegazioni degli studenti, generavano deliberatamente uno stato di incertezza negli allievi. Questo spingeva gli studenti a collaborare, discutere le evidenze e rivedere le proprie idee, portandoli gradualmente a costruire spiegazioni più solide e coerenti. In pratica, gli studenti imparano accumulando esperienza sul processo scientifico reale, in cui è necessario decidere se i dati sono sufficienti, quali conclusioni trarre con cautela e come confrontare ipotesi alternative, facendo della gestione dell'incertezza un motore per l'apprendimento. Naturalmente, ciò richiede un bravo facilitatore: Chen e colleghi notano che gli insegnanti efficaci mantenevano l'incertezza "alta" per il giusto tempo (incalzando con domande) e poi la riducevano sintetizzando i punti emersi e consolidando le nuove conoscenze acquisite dalla classe. Questo ciclo rispecchia il modo in cui gli scienziati affrontano l'ignoto: esplorazione, dubbio, confronto e, infine, convergenza su conclusioni provvisorie ma robuste.

Sempre per insegnare agli studenti a convivere con l'incertezza quando applicano la scienza ai problemi della società, Covitt e Anderson (2022) propongono di esplicitare a scuola la distinzione tra "incertezza" e "affidabilità" della scienza. Essi sostengono che spesso i dibattiti pubblici confondono i due piani: i critici esterni accusano la scienza di non essere affidabile a causa di bias o interessi (questioni di fiducia), mentre nella comunità scientifica interna il focus è sulle limitazioni dei dati e delle teorie (questioni di incertezza intrinseca). Nel loro articolo, invitano a educare gli studenti su come la scienza possa essere allo stesso tempo incerta e affidabile e che, anche con margini di errore e ipotesi rivedibili, il metodo scientifico offre conoscenze utili e solide su cui basare le decisioni. Un obiettivo didattico diventa quindi far comprendere che riconoscere l'incertezza (ad esempio, indicando l'errore sperimentale o la presenza di ipotesi semplificative in un modello) non mina la fiducia nella scienza, bensì è indice di onestà e rigore. Per raggiungerlo, Covitt e Anderson suggeriscono attività didattiche in cui gli studenti praticano l'analisi dell'incertezza: ad esempio, raccogliere dati in laboratorio e discutere quali limiti e variabilità sono stati ottenuti, oppure esaminare articoli di giornale su temi scientifici, identificando quali elementi sono certi e quali incerti nel report. Questo allenamento aiuta i futuri cittadini a non farsi destabilizzare da messaggi come "la scienza cambia idea" o "ci sono ancora incertezze", perché avranno compreso che il progresso della conoscenza include naturalmente correzioni e intervalli di confidenza.

In questa direzione si inserisce anche l'idea di introdurre il ragionamento Bayesiano nell'educazione scientifica di base (Rosenberg et al., 2022). Un approccio bayesiano può insegnare a concepire la conoscenza in termini di gradi di credibilità che si aggiornano con nuove evidenze, anziché con verità assolute. Rosenberg e colleghi mostrano come concetti semplificati di Bayes (ad es. l'aggiornamento delle probabilità al ricevere un nuovo dato) possano essere compresi anche da studenti giovani e utilizzati per valutare affermazioni in condizioni di incertezza. Insegnare agli studenti a pensare in termini probabilistici – per esempio, attraverso giochi

interattivi o widget che visualizzano come nuove informazioni modificano il nostro grado di fiducia in un'ipotesi – può aiutarli a vedere la scienza non come bianco o nero, ma come un processo di raffinamento progressivo delle stime. Questo non solo migliora la comprensione concettuale (soprattutto in temi come l'evoluzione, fisica quantistica e i cambiamenti climatici, dove l'alea è parte del fenomeno), ma può costruire fiducia nella scienza: se il pubblico capisce che è normale che gli scienziati aumentino o diminuiscano la probabilità di avvenimento di un certo evento grazie alla presenza di nuovi dati, ciò verrà percepito come un segno di forza (la scienza si adatta alle evidenze) e non di debolezza. In breve, l'educazione scientifica che incorpora l'incertezza prepara individui più resilienti epistemicamente, capaci di valutare rischi (es. "quanto è probabile questo esito?") e di prendere decisioni ponderate anche senza garanzie assolute – una competenza fondamentale in materia di clima e sostenibilità.

1.1 Ruolo dei modelli nella comunicazione dei cambiamenti climatici

Questa visione dell'incertezza come risorsa è in linea con sviluppi nella filosofia della scienza che enfatizzano il carattere fallibilista e autocorrettivo della conoscenza scientifica (ad esempio: Lakatos, 1970; Funtowicz & Ravetz, 1993; Oreskes, 2019); il progresso scientifico non avviene per accumulo lineare di certezze, ma attraverso un processo dinamico di congetture e confutazioni in cui le teorie vengono continuamente messe alla prova e affinate, e le aree di incertezza giocano un ruolo nell'orientare tali prove. In particolare, nei modelli scientifici, l'incertezza assume varie forme e ruoli, che si vogliono esaminare nel prossimo capitolo, con un focus sui modelli utilizzati nello studio del cambiamento climatico.

Definiamo ora cosa intendiamo per modello. La questione è centrale perché la risposta influisce significativamente sul modo in cui interpretiamo la rappresentazione e la conoscenza prodotta dai modelli. Un modello è definito come una rappresentazione esterna di un sistema o fenomeno. Esso può essere di tipo analogico (es. il modello planetario dell'atomo), in cui il fenomeno da studiare, detto *bersaglio*, è indagato attraverso un altro sistema più comprensibile, detto *sorgente* (Vosniadou & Ortony, 1989). La rappresentazione avviene tramite un mapping fra la sorgente e il bersaglio, tale per cui alcune proprietà della prima consentono di inferire proprietà della seconda (Giere, 2004). In generale, i modelli sono rappresentazioni idealizzate e astratte della realtà, costruite su semplificazioni (scelte) di dettagli importanti per ottenere controllo inferenziale e potere esplicativo (Weisberg, 2013). Di conseguenza, la bontà di un modello non va intesa in termini di verosimiglianza globale, ma di adeguatezza allo scopo, in quanto un medesimo modello può essere appropriato per spiegare, prevedere o supportare decisioni in modi diversi a seconda del compito (Parker, 2020). In questo senso, i modelli sono strumenti necessari per costruire un ponte operativo fra principi generali e fenomeni

particolari, rendendo trattabili porzioni del mondo proprio grazie alla loro costruita parzialità (Morgan & Morrison, 1999). Essi non sono copie della realtà, ma rappresentazioni selettive che isolano tratti ritenuti rilevanti per uno scopo cognitivo o pratico, svolgendo una funzione mediatrice tra teorie e mondo (Morgan & Morrison, 1999). Infatti, essi possono avere scopi epistemici, ad esempio descrivere, spiegare e predire fenomeni naturali, ma anche scopi sociali, poiché possono servire a comunicare concetti scientifici complessi in forma semplificata agli altri (Oh & Oh, 2011). In altre parole, il modello è un artefatto che supporta la comprensione individuale e, al contempo, uno strumento condivisibile che facilita la discussione.

Anche i modelli scientifici sono rappresentazioni semplificate di fenomeni o sistemi reali, costruiti per comprenderne il funzionamento, trarre previsioni o fornire spiegazioni (Gilber & Justi, 2016). Nell'affrontare il tema dell'incertezza, questi (in particolar modo quelli climatici) emergono come strumenti chiave che collegano il lavoro degli scienziati con la comunicazione al pubblico e l'insegnamento nelle scuole. Possiamo considerarli veri e propri *boundary objects* (Akkerman & Bakker, 2011; Shackley & Wynne, 1996; van Egmond & Zeiss, 2010) in grado di transitare tra il contesto della ricerca, quello delle decisioni politiche (De Pryck & Hulme, 2022) e quello educativo (Shepherd & Lloyd, 2021).

I *boundary objects* si riferiscono ad artefatti sufficientemente plastici da adattarsi alle esigenze specifiche e ai vincoli dei diversi contesti in cui si usano, ma sufficientemente robusti da mantenere un'identità comune tra i diversi contesti (Star, 1989). Ad esempio, nel caso del clima, abbiamo che alcuni modelli sono progettati per la ricerca, come strumenti rigorosi per generare proiezioni e testare ipotesi; altri, imparentati ma distinti, vengono costruiti per la comunicazione pubblica (visualizzazioni sintetiche, mappe di impatto locale, storie di eventi); altri ancora sono pensati ad hoc per la didattica, ad esempio sotto forma di simulazioni interattive o attività investigative che coinvolgono gli studenti nel metodo scientifico. In ciascuno di questi casi, il nocciolo – i principi fisici di base e l'uso di dati osservativi – rimane riconoscibile, ma viene rielaborato in una forma modellistica e in un linguaggio adatto all'utente finale (che può essere un ricercatore, un decisore, un cittadino o uno studente). Come evidenziano Miani e colleghi (2025b), i modelli non vanno quindi visti solo come strumenti per fare previsioni, ma anche come oggetti ponte capaci di connettere diversi livelli di rappresentazione e di favorire pratiche di apprendimento e discussione consapevole attorno a incertezza e decisione. È questa portabilità del quadro modellistico a renderlo promettente per colmare, almeno in parte, il gap tra scienza e società riguardo all'incertezza.

Nel parlare di clima e di fenomeni complessi, l'uso delle simulazioni computazionali è stato di tale importanza da essere oggi considerato il “terzo pilastro della scienza”, oltre a teoria e esperimenti. Le simulazioni sono oggetti che inglobano diversi livelli di modellizzazione, quella del fenomeno fisico (e/o sociale) da studiare, quella

matematica e quella computazionale. Ognuno di questi livelli ha propri vincoli e determina propri meccanismi di semplificazione e astrazione. L'importanza delle simulazioni è cruciale anche dal punto di vista comunicativo e didattico, soprattutto quando si tratta di comunicare e educare al concetto di scenario. Nel trattare le simulazioni per la costruzione di scenari, queste diventano un “laboratorio virtuale” in cui gli studenti possono manipolare condizioni, esplicitare assunzioni e osservare come gli output dipendano dai parametri, sviluppando anche *future-scaffolding skills* (distinzione tra *forecasting* e *foresight*, pratiche di *backcasting*, come vediamo in tabella 1), utili a ragionare sull'incertezza e sulle decisioni (Barelli, 2017).

La terminologia che utilizziamo per descrivere queste pratiche proviene in larga parte dall'ambito dei *future studies* e si è consolidata negli ultimi 30–40 anni.

Soffermarsi su queste distinzioni lessicali non è un dettaglio marginale, ma permette di mettere a fuoco i diversi modi in cui si può ragionare rispetto al futuro nelle *future-oriented practices*. La tabella 1.1 sintetizza queste differenze, facendo riferimento ai contributi concettuali di Bell (2003), Branchetti e colleghi (2018), Levrini e colleghi (2019, 2021), Poli (2018) e Voros (2003).

<i>Future-scaffolding Skills</i>	Competenze necessarie per il futuro che vengono acquisite attraverso un sostegno temporaneo, proprio come un'impalcatura. L'obiettivo è quello di fornire un supporto graduale per permettere l'acquisizione autonoma di queste abilità, che includono capacità cognitive, digitali e sociali.
<i>Forecasting</i>	Il forecasting (previsione) è un'analisi quantitativa che stima un futuro probabile basato sui dati passati e si concentra sul breve termine, cercando di prevedere cosa accadrà.
<i>Foresight</i>	Il foresight è un processo qualitativo che esplora più scenari futuri, compresi quelli inattesi, su un orizzonte di medio-lungo termine, mirando a prepararsi per una serie di possibilità.
<i>Backcasting</i>	Il backcasting è la definizione di una visione futura desiderata e la successiva pianificazione a ritroso delle tappe necessarie per raggiungerla partendo dal presente. Questo approccio è attivo e strategico, poiché si concentra sulla costruzione di un percorso per arrivare a uno scenario futuro, anziché limitarsi a prevederlo

Tabella 1.1: definizioni della terminologia necessaria per muoversi all'interno dei *future studies*.

Al tempo stesso, un'indagine su studenti universitari condotta da Barelli (2021) mostra concezioni eterogenee di “simulazione” (rapporto con esperimenti e modelli; tipologie *equation-based*, *agent-based*, Monte Carlo), indicando la necessità di un'alfabetizzazione epistemica esplicita delle simulazioni nei curricula, così da valorizzare il potenziale cognitivo e comunicativo dei modelli senza occultarne i limiti.

L'uso dei modelli e delle simulazioni per insegnare concetti di climatologia e incertezza offre un contributo decisivo alla formazione scientifica. Strumenti di simulazione del clima, come ad esempio EN-ROADS, rendono visibile come proiezioni differenti derivino da assunzioni differenti, introducendo la possibilità di avere diversi scenari e, dunque, la presenza di un ventaglio di possibili futuri. Allo stesso tempo, il confronto tra versioni alternative di un modello aiuta a comprendere che la scienza del clima è intrinsecamente caratterizzata da incertezza: aspetti come la sensibilità climatica o i processi nuvolosi, ancora non pienamente compresi, generano intervalli di plausibilità più che previsioni puntuali. Attraverso l'analisi delle differenze tra modelli leggermente diversi, gli studenti possono cogliere che la conoscenza scientifica non procede per verità definitive, ma per approssimazioni migliorabili fondate su evidenze.

Come messo in luce da Miani e colleghi (2025b), lavorare con modelli inevitabilmente incompleti o incerti diventa così un'occasione didattica per problematizzare l'immagine lineare e deterministica della scienza e per mostrare come il lavoro scientifico si sviluppi entro un paradigma fallibilista, dialogico e continuamente rinegoziato. In questo modo, complessità e incertezza non sono presentate come ostacoli, ma come elementi essenziali per comprendere la natura della scienza e per affrontare la sfida del cambiamento climatico in un'ottica autenticamente interdisciplinare.

Monroe et al. (2019) hanno valutato queste strategie conducendo una revisione sistematica delle ricerche nell'ambito della *climate change education* per identificare quali strategie risultino effettive. L'analisi esamina gli scopi degli interventi, le metodologie di valutazione e le strategie associate a risultati positivi. Dalla sintesi emergono quattro temi specifici del clima — discussioni deliberative, interazione con scienziati, correzione delle misconcezioni, progetti scolastici o di comunità — e due temi generali dell'educazione ambientale efficaci anche sul clima, ossia significatività dei contenuti e l'uso di metodi attivi e coinvolgenti, come quello di dati reali e modelli. L'uso di modelli climatici in classe può infatti sviluppare sia competenze disciplinari (comprensione di fenomeni fisici, analisi di dati) sia competenze trasversali come il futures thinking, ossia immaginare futuri possibili in base a decisioni diverse (mitigazione forte vs scenario *“business-as-usual”*). Questo contribuisce anche a formare una mentalità orientata alla sostenibilità (Bianchi et al., 2022).

Un altro esempio concreto dell'impiego didattico dei modelli come *boundary objects* è l'integrazione dell'approccio *storyline* nell'educazione scientifica. Ad esempio, Miani e Levrini (2024) hanno recentemente analizzato il potenziale formativo delle *storyline* sul cambiamento climatico nella scuola. L'idea è di portare in classe casi di eventi estremi (tratti anche dalla cronaca recente) e far lavorare gli studenti come ricercatori: usando dati e simulazioni semplificate, cercano di ricostruire la “trama” dell'evento, identificando quali fattori sono naturali e quali sono connessi al riscaldamento globale. Questo metodo didattico esplicita sin da subito la presenza di

diversi fattori e di diverse incertezze: ad esempio, gli studenti distinguono l'incertezza sul "che sarebbe successo senza quell'elemento" (scenario controveggente) dall'incertezza sul "quanto esattamente ha contato ciascun fattore". Secondo Miani e Levrini, ciò potrebbe aiutare gli studenti a sviluppare competenze di pensiero critico e sistematico. Questo tipo di attività spinge a vedere un fenomeno non come causato da un solo fattore, ma come risultato di concause (componenti scientifiche, sociali, naturali) e a ragionare in termini di reti causali. Importante, sottolineano gli autori, è che questo approccio favorisca anche la percezione di responsabilità e *agency*: poiché nella storyline si isolano i contributi umani a un disastro, gli studenti colgono meglio in che modo l'azione (o l'inazione) umana incide e, dunque, maturano un senso di efficacia nel poter intervenire per prevenire eventi futuri peggiori. In altre parole, il modello climatico in questo contesto non è più solo un insieme di equazioni, ma diventa un ponte concettuale tra il mondo scientifico e quello sociale, collegando le cause fisiche con le conseguenze umane, permettendo di discutere anche di etica e decisioni.

L'interesse di ricerca verso l'approccio *storyline*, negli ultimi anni, è dato dal fatto che sia emerso, specialmente nei report IPCC, come strategia complementare di comunicazione anche verso i *policy makers*, utilizzando i modelli climatici per costruire narrazioni concrete di eventi estremi. Invece di rispondere alla domanda puramente statistica "qual è la probabilità che un certo tipo di evento si verifichi a causa del cambiamento climatico?", l'approccio storyline propone di chiedere "in che modo il cambiamento climatico ha influenzato l'evento X che abbiamo osservato?". Questa metodologia (Trenberth, 2015; Shepherd, 2019) sfrutta i modelli climatici per simulare scenari controveggenti ("mondo senza emissioni antropiche") e confrontarli con il mondo reale, isolando l'impatto del cambiamento climatico su un evento specifico. Il vantaggio comunicativo è notevole perché offrendo al pubblico e ai policy-maker una storia comprensibile – un evento reale, con cause ed effetti chiari – si rende l'informazione climatica più tangibile. Infatti, "è più difficile convincere a investire in difesa contro un rischio ipotetico, mentre è più facile farlo quando un evento è già accaduto e dunque può ripetersi, potenzialmente con impatti maggiori" (Shepherd, 2016, p. 33). Shepherd nota che molte decisioni vengono prese sull'onda di eventi già accaduti, e che se la scienza del clima riuscisse a collegare direttamente un disastro recente al cambiamento climatico, quantificandone l'effetto, allora l'incertezza potrebbe apparire meno astratta, e l'urgenza di agire più concreta. In pratica, i modelli climatici vengono usati come laboratori virtuali dove, per esempio, si può riavvolgere la storia e provare a ripartire senza la forzante antropica, stimando così quante probabilità o quale intensità un evento avrebbe avuto in un clima non alterato. Hazeleger e colleghi (2015) hanno chiamato questo approccio "tales of future weather", sottolineando come raccontare il meteo del futuro (o eventi estremi futuri plausibili) con dovizia di dettagli locali aiuti i decisori a pianificare strategie di adattamento. Dunque, sul versante comunicativo, i modelli diventano "oggetti ponte" perché permettono di tradurre l'output scientifico (curve probabilistiche) in narrazioni comprensibili e rilevanti per la società, senza perdere il

rigore quantitativo di base. Questa opera di mediazione tra il linguaggio della scienza e quello del senso comune è fondamentale per colmare il divario tra certezza percepita e incertezza scientifica.

Nonostante alcuni nella comunità scientifica tradizionale abbiano inizialmente criticato l'approccio storyline temendo che potesse “abbassare gli standard” o sembrare meno oggettivo, oggi esso è riconosciuto come complementare all'approccio probabilistico standard, soprattutto in termini di engagement pubblico. Lloyd e Oreskes (2018) analizzano questa controversia e concludono che in realtà non c'è contraddizione tra i due approcci in quanto si tratta di bilanciare il rischio di attribuire causalità climatica a un evento che potrebbe essere naturale con il rischio di mancare di riconoscere l'influenza del clima su eventi dannosi. In contesti ad alta posta in gioco, sostengono gli autori, è peggio ignorare un segnale reale (sottovalutare un impatto climatico) che lanciare un falso allarme sporadico; pertanto le storyline, pur trattandosi di studi legati a casi specifici e con modalità di gestione delle incertezze diverse, possono orientare più prontamente l'azione preventiva. Questa filosofia si riallaccia alla necessità – tipica del mondo decisionale e comunicativo – di avere messaggi chiari e tempestivi, anche se affetti da un certo grado di incertezza. I modelli climatici forniscono la base quantitativa per tali messaggi, ma la forma narrativa li rende accessibili: ciò li pone esattamente al confine tra produzione di conoscenza e utilizzo pratico della conoscenza, da cui il loro ruolo di boundary objects.

1.2 Domande di ricerca

La scelta di focalizzare la tesi su questi tre assi (modelli climatici, comunicazione verso i decisori politici e didattica) è motivata dalla letteratura in tre sensi complementari. Primo, i modelli costituiscono l'infrastruttura epistemica della conoscenza climatica contemporanea e, nella loro gerarchia (dai modelli concettuali agli Earth System Models), offrono una mappa operativa delle fonti di incertezza e dei compromessi tra realismo e controllabilità, utile sia a chi comunica sia a chi insegna. Secondo, i modelli fungono da “linguaggio pidgin” capace di portare significato senza perdere rigore, facilitando il passaggio dalla descrizione alla decisione e dall'astratto al concreto (Shepherd & Lloyd, 2021). Terzo, la didattica dell'incertezza - dall'argomentazione al pensiero bayesiano - trova nei modelli un laboratorio per praticare l'incertezza in modo autentico, sviluppando competenze che la letteratura collega a una cittadinanza epistemica più matura e a una comunicazione scientifica più efficace. In sintesi, i modelli sono oggetti ponte perché tengono insieme ciò che, altrimenti, rimarrebbe disgiunto: il tecnicismo della simulazione, l'usabilità dell'informazione e la formazione di competenze.

Alla luce del quadro tracciato, le domande che guidano il lavoro sono quattro, corrispondenti ai tre assi di analisi e al loro incrocio operativo:

1. Quali sono le difficoltà intrinseche nella rappresentazione dell'incertezza nei modelli climatici, considerando fonti epistemiche e aleatorie, gerarchie modellistiche e tensione tra affidabilità e informatività?
2. Come viene gestita e comunicata l'incertezza ai decisori? Quali soglie di prova sono in gioco e come si bilanciano errori di diverse tipologie nel passaggio dalla sintesi scientifica alla decisione?
3. Quali difficoltà emergono nel trasferimento dall'IPCC alle scuole, dalla comprensione dei qualificatori probabilistici alla distinzione tra incertezza e affidabilità e alle pratiche che rendono l'incertezza un motore di apprendimento?
4. A partire dal confronto tra quadro teorico e voci degli studenti, è possibile elaborare dei principi operativi, per comunicare e insegnare l'incertezza climatica, che valorizzino la tensione certezza-incertezza come risorsa cognitiva ed emotiva?

Nel prosieguo della tesi, queste domande vengono affrontate seguendo due strategie metodologiche complementari. Le prime due trovano risposta soprattutto attraverso la costruzione di uno stato dell'arte: nei capitoli 2 e 3 viene proposta un'analisi concettuale e una ricostruzione critica della letteratura sui modelli climatici e sul framework IPCC per l'incertezza, mettendo in evidenza le diverse fonti di incertezza, le modalità di rappresentazione e le implicazioni per la comunicazione verso i decisori. Le risposte a terza e quarta domanda sono invece sviluppate in modo più operativo: nel capitolo 4 si introducono le difficoltà condivise nella letteratura in didattica della scienze nel gestire la l'incertezza climatica, mentre nel quinto vengono analizzati i dati di un focus group sull'incertezza climatica, progettato insieme alla prof.ssa Levrini e al dott. Miani. Da questi sono stati ricavati una serie di principi operativi per gestire in modo consapevole la tensione tra certezza e incertezza in ambito educativo e comunicativo.

Capitolo 2 - Incertezza nei modelli scientifici e nei modelli climatici

In questo capitolo esamineremo dapprima le diverse tipologie di modelli (idealizzati, analogici, matematici, euristici, ecc.) e poi, per comprendere l'incertezza nei modelli, parleremo di come i modelli rappresentano la realtà (il problema della rappresentazione scientifica). In questo ci appoggiamo in particolare alla letteratura di filosofia della scienza sui modelli (in primis Bokulich & Parker, 2021; Frigg & Hartmann, 2025; Parker, 2020), ai manuali di climatologia dinamica (come James, 1994; Marshall & Plumb, 2016; Wallace & Hobbs, 2006) e alle lezioni del corso di Climatology del prof. Paolo Ruggeri, che ho seguito nell'anno accademico 2023-2024.

La letteratura ha classificato i modelli in molti modi e possiamo elencare una grande varietà di termini usati per descriverli: modelli fenomenologici, computazionali, di sviluppo, esplicativi, idealizzati, teorici, in scala, euristici, caricaturali, esplorativi, didattici, fantastici, minimali, toy models, matematici, meccanicistici, sostitutivi, iconici, formali, analogici, strumentali e altri ancora (Frigg & Hartmann, 2025). Questa proliferazione di termini riflette la moltitudine di usi e ruoli dei modelli nella scienza (Bailer-Jones, 2009; Morrison & Morgan, 1999). Seguendo la discussione tipologica proposta da Frigg e Hartmann (2025) e da altri autori sulla modellizzazione scientifica (ad es. Bailer-Jones, 2009; Weisberg, 2013), in questo capitolo raggrupperò tali nozioni in quattro famiglie, che saranno al centro della nostra analisi: modelli idealizzati, modelli analogici, modelli matematici/computazionali e modelli euristici.

- **Modelli idealizzati:** Sono modelli che includono idealizzazioni, cioè assunzioni semplificatrici o volutamente false per rendere il problema trattabile. Come spiegano Frigg e Hartmann (2025), un'idealizzazione è una semplificazione deliberata di qualcosa di complicato, con l'obiettivo di renderlo più trattabile. Esempi classici sono i piani senza attrito, i pendoli senza resistenza dell'aria, le popolazioni isolate in biologia, gli agenti economici perfettamente razionali e onniscienti, ecc. Tali modelli isolano alcuni fattori considerati rilevanti ed eliminano tutto il resto (idealizzazione aristotelica, che astrae da caratteristiche ritenute irrilevanti), oppure distorcono intenzionalmente la realtà per ottenere un caso estremo semplice da analizzare (idealizzazione galileiana, che introduce assunzioni irrealistiche come attrito nullo, punto materiale, ecc.). Ad esempio, un modello climatico idealizzato potrebbe assumere che la Terra sia coperta uniformemente d'acqua (eliminando le complessità dei continenti e della topografia) per studiare solo la circolazione oceanico-atmosferica in modo semplificato. Oppure, il celebre modello di Arrhenius sul clima (1896)

assumeva la Terra come un pianeta omogeneo per stimare l'effetto dell'anidride carbonica in modo approssimativo.

I modelli idealizzati sono utili perché spiegano certi comportamenti eliminando il rumore di fondo; tuttavia, sollevano un problema classico in filosofia della scienza: fino a che punto un modello che sappiamo essere falso (a causa delle idealizzazioni) ci dice comunque qualcosa di vero sul mondo reale? (ad es., Frigg & Hartmann, 2025; McMullin, 1985; Potocknik, 2017).

- **Modelli analogici:** Un modello analogico è un modello in cui si rappresenta un sistema bersaglio tramite un altro sistema che ha somiglianze strutturali o di comportamento con il primo. Un esempio di questo tipo di modelli in climatologia è la vasca rotante con fluidi, che talvolta si usa per modellare analogicamente l'atmosfera terrestre, dove i vortici che si formano nel fluido rotante possono replicare cicloni e anticicloni. Un altro esempio è la simulazione al computer di un clima extraterrestre, che può fungere da analisi per il nostro e viceversa. Le analogie possono essere materiali (somiglianze nelle proprietà fisiche) o formali (somiglianze nella struttura matematica) (Hesse, 1966). Le analogie aiutano l'intuizione: guardando un sistema più accessibile o visualizzabile, possiamo intuire i comportamenti del sistema di interesse. Come notato da Hesse, spesso le analogie svolgono un ruolo euristico potente perché generano nuove ipotesi e domande esplorando le "*neutral analogies*" (Hesse, 1966, p. 25), ossia aspetti in cui non sappiamo se la somiglianza regga o meno.
- **Modelli matematici/computazionali:** Si tratta di modelli espressi in forma di equazioni matematiche (modelli analitici) o implementati attraverso algoritmi e simulazioni al calcolatore (modelli numerici), come nel caso di quasi tutti i modelli climatici di una certa complessità (James, 1994; Marshall & Plumb, 2016; Wallace & Hobbs, 2006). Ad esempio, come visto nel corso di Climatology del prof. Ruggeri, un modello di circolazione generale, o GCM, consiste in un insieme di equazioni (derivate dalle leggi fisiche della fluidodinamica, della termodinamica, ecc.) che vengono risolte numericamente su un supercomputer. In generale, i modelli computazionali possono essere molto dettagliati (come i GCM con migliaia di variabili) oppure estremamente semplici (come l'equazione di Lotka-Volterra nel modello predatore-preda). La caratteristica dei modelli matematici è che essi operano in un mondo formale: il modello è essenzialmente un sistema matematico in cui la rappresentazione avviene tramite la corrispondenza tra grandezze nel modello e grandezze nel mondo (es. una variabile $T(x,y,z,t)$ rappresenta la temperatura dell'aria in un punto del globo in un certo istante di tempo). Questo tipo di modelli è particolarmente efficace perché permette di dedurre conseguenze logiche dalle ipotesi, ma soffre anch'esso di idealizzazioni dovute al fatto che nessun modello matematico include tutto (Stone & Risbey, 1990). Infatti, nonostante si debbano selezionare equazioni e parametri

chiave, spesso i modelli complessi richiedono ulteriori semplificazioni per essere risolvibili; ad esempio, nei modelli climatici vengono discretizzati spazio e tempo, trattando volumi d'aria di decine di km come omogenei e parametrizzando processi sub-grid come la formazione delle nuvole con formule empiriche. Come nota il climatologo Stephen Schneider (1984), il modello climatico ideale includerebbe tutti i processi fisici noti e con risoluzione spazio-temporale finissima, ma per essere utilizzabili i modelli odierni, pur avvicinandosi a tale ideale, vedono ancora molti compromessi e approssimazioni. In altre parole, per motivi sia teorici che computazionali, ogni modello complesso incorpora semplificazioni rispetto alla realtà.

- **Modelli euristici:** Con questo termine ci si riferisce a modelli intenzionalmente molto semplici, costruiti non tanto per fare previsioni accurate, ma per esplorare idee, principi di base o possibilità. Spesso detti modelli giocattolo (toy models) o modelli concettuali, essi sacrificano il realismo per la trasparenza e la comprensibilità (Massimi, 2019; Reutlinger et al., 2018). Un esempio nell'ambito del clima è il modello di Budyko-Sellers (1969) della temperatura terrestre media: un'equazione differenziale che considera solo l'equilibrio tra radiazione solare in entrata e radiazione uscente, con un termine di retroazione ghiaccio-albedo. Questo modello over semplificato permette, però, di comprendere stati climatici estremi, come ad esempio l'intera terra ricoperta di neve, senza dover simulare l'intero clima. Un altro esempio di modello euristico è il modello Daisyworld (Watson e Lovelock, 1983), in cui un pianeta immaginario, ricoperto di margherite chiare e scure, autoregola la temperatura: è un modello del tutto fittizio, ma concepito per illustrare il principio della regolazione biotica del clima nel contesto dell'ipotesi Gaia¹; in questo modello si considerano solo il colore dei fiori e la temperatura, ignorando qualsiasi altro fattore ecologico, per mostrare il concetto di omeostasi.

Questi modelli hanno una funzione essenzialmente pedagogica o esplorativa, mostrando "cosa potrebbe succedere se..." e isolando un meccanismo in forma pura. Il dibattito filosofico gira intorno alla domanda: "tali modelli-fantoccio possono essere scientificamente utili?" Molti sostengono di sì, in quanto sono strumenti di ragionamento controfattuale e di generazione di ipotesi (ad esempio, Frigg & Hartmann, 2025; Nguyen, 2020), mentre altri obiettano che la distanza dalla realtà concreta potrebbe compromettere la loro capacità di fornire informazioni affidabili sul mondo reale e sui fenomeni specifici che mirano a rappresentare (ad esempio, Cartwright, 1983; Oreskes et al., 1994; Strevens, 2008). In questo senso è interessante il contributo di Naomi Oreskes, storica e filosofa della scienza, che ha osservato come

¹ Ipotesi Gaia: un'ipotesi secondo la quale gli organismi viventi sulla Terra interagiscono con le componenti inorganiche circostanti per formare un complesso sistema sinergico e autoregolante che aiuta a mantenere e perpetuare le condizioni per la vita sul pianeta.

spesso si usino modelli per studiare sistemi troppo grandi, complessi o lontani per essere investigati direttamente, il che li rende strumenti indispensabili - in assenza di alternative migliori - ma al tempo stesso introduce nuove dimensioni di incertezza. Poiché i modelli climatici incorporano numerose approssimazioni e parametri tarati, non possiamo presumere che le loro proiezioni rispecchino fedelmente la realtà senza verifica empirica rigorosa. In sostanza, Oreskes sottolinea che maggiore è la distanza di un modello dalla verifica sperimentale diretta, minore è la nostra confidenza nella sua capacità di fornire predizioni affidabili sul mondo effettivo.

Queste categorie non sono mutualmente esclusive: un singolo modello spesso appartiene a più categorie. Ad esempio, un modello analogico in scala, come una piccola vasca oceanica rotante per studiare l'atmosfera, è anche un modello idealizzato (perché distorce molte cose rispetto all'atmosfera reale, riducendola a un fluido omogeneo in laboratorio) ed è certamente euristico (serve a esplorare concetti, non a prevedere numeri esatti). Un modello di circolazione generale è matematico e computazionale, ma contiene idealizzazioni.

In generale, come osservano Frigg e Hartmann (2025), la varietà di modelli corrisponde alla varietà di scopi per cui li utilizziamo: spiegare, predire, esplorare, comunicare, insegnare, ecc. Per la nostra discussione sull'incertezza è sufficiente notare, per ora, che modelli costruiti per scopi diversi mettono in gioco anche forme diverse di incertezza, legate ai loro assunti, alla loro struttura e al modo in cui vengono utilizzati. Nelle sezioni successive torneremo in modo più sistematico su questo punto, introducendo una tassonomia più precisa dei tipi di incertezza rilevanti per i modelli scientifici e, in particolare, per i modelli climatici.

2.1 Costruzione di un modello climatico

La previsione del clima si fonda sulla comprensione dei meccanismi fisici che regolano l'atmosfera terrestre, l'oceano, la criosfera e la biosfera. La complessità di questi sistemi deriva dalla loro natura non lineare e accoppiata, in cui piccole variazioni iniziali possono amplificarsi nel tempo, rendendo difficile prevedere con precisione il comportamento futuro su lunghi periodi (James, 1994; Marshall & Plumb, 2016). Questo fenomeno è stato esplorato per la prima volta negli anni '60 da Edward Lorenz (1963, 1969a), il quale scoprì che anche sistemi deterministici, come quelli che governano l'atmosfera, possono mostrare un comportamento apparentemente casuale, noto come caos deterministico. Tuttavia, la prevedibilità a lungo termine del clima non è limitata dalle stesse scale temporali della prevedibilità meteorologica: mentre le previsioni del tempo sono intrinsecamente limitate a pochi giorni o settimane, il clima, inteso come media statistica di variabili atmosferiche su lunghi periodi, offre una prevedibilità più ampia, legata a forzanti come la radiazione solare, la concentrazione di gas serra e la circolazione oceanica.

In particolare, Frigg e colleghi (2015) distinguono principalmente due classi di definizioni di clima: quelle che concepiscono il clima come una distribuzione nel tempo (distribuzione temporale) e quelle che lo concepiscono come una distribuzione di *ensemble* (distribuzione d'insieme). Nel primo caso, il clima viene definito come la distribuzione statistica di alcune variabili climatiche (ad esempio, temperatura atmosferica, precipitazioni, temperatura degli oceani) osservata su un certo intervallo di tempo. Il clima, in questo senso, rappresenta una sorta di tempo medio, ovvero una descrizione statistica dei fenomeni atmosferici osservati storicamente. Questa definizione corrisponde in buona parte a quella adottata dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), la quale identifica classicamente un periodo standard di 30 anni per calcolare i parametri climatici medi e le relative variabilità (WMO, 2017). Invece, le definizioni basate su ensemble definiscono il clima come la distribuzione delle possibili condizioni climatiche ottenute da un insieme di simulazioni numeriche. In questo approccio, il clima non rappresenta più una semplice descrizione del tempo osservato, ma si riferisce alle possibili evoluzioni future o alle possibili configurazioni del sistema climatico, tutte considerate ugualmente plausibili in assenza di informazioni più precise (Parker, 2010).

Indipendentemente dalla definizione adottata, la prevedibilità climatica rimanda alla struttura fisica del sistema e alle sue interazioni accoppiate; è dunque opportuno delineare le principali componenti e i nessi che ne determinano la variabilità. Il sistema climatico terrestre è un sistema dinamico complesso in cui le varie componenti sono interconnesse, interagendo attraverso flussi di energia, materia e momento; le principali parti che compongono il sistema climatico sono (Wallace & Hobbs, 2006):

- l'atmosfera, ossia lo strato gassoso che circonda la Terra, composto principalmente da azoto (N_2), ossigeno (O_2) e gas serra come anidride carbonica (CO_2), metano (CH_4) e vapore acqueo (H_2O);
- l'idrosfera, che ricopre circa il 71% della superficie terrestre e svolgono un ruolo fondamentale nella regolazione del clima attraverso la capacità termica, la circolazione oceanica e lo scambio di gas con l'atmosfera;
- la criosfera, la quale include tutte le superfici ghiacciate della Terra e possiede un'elevata albedo, riflettendo così una grande quantità di radiazione solare e influenzando il bilancio energetico;
- la biosfera, che comprende tutti gli organismi viventi che interagiscono con l'atmosfera, gli oceani e il suolo, influenzando il ciclo del carbonio e l'albedo terrestre;
- la litosfera, ossia lo strato solido della Terra, che interagisce con l'atmosfera e la biosfera attraverso processi di erosione, vulcanismo e scambi di gas.

Le interazioni tra queste componenti (vedi Fig. 2.1) avvengono su diverse scale temporali e spaziali e sono responsabili della variabilità climatica e delle dinamiche del sistema. La comprensione delle dinamiche delle interazioni è essenziale per prevedere i cambiamenti climatici futuri e sviluppare strategie di mitigazione e adattamento (Marshall & Plumb, 2016). In particolare:

- L'atmosfera e gli oceani sono strettamente interconnessi attraverso il trasferimento di energia, umidità e gas: la circolazione atmosferica guida i venti superficiali che influenzano le correnti oceaniche, mentre gli oceani immagazzinano e ridistribuiscono l'energia termica a livello globale. La circolazione termoalina, nota anche come nastro trasportatore oceanico, è un esempio di tale interazione, essendo guidata dalle differenze di densità dovute a variazioni di temperatura e salinità. Essa svolge un ruolo cruciale nel trasporto di calore dalle regioni equatoriali a quelle polari.
- La criosfera interagisce con l'atmosfera attraverso il feedback ghiaccio-albedo. Quando la copertura di ghiaccio diminuisce, l'albedo della superficie terrestre diminuisce, causando un maggiore assorbimento di radiazione solare e un ulteriore riscaldamento. Questo feedback positivo amplifica il riscaldamento globale, specialmente nelle regioni polari. In questo contesto, è importante sottolineare l'interazione tra oceano e criosfera, evidente nelle regioni polari, dove il calore trasportato dalle correnti oceaniche influisce sullo scioglimento dei ghiacci marini e delle calotte glaciali. Questo scioglimento contribuisce all'innalzamento del livello del mare e modifica le proprietà fisiche degli oceani, come la salinità e la densità.

La biosfera influenza il sistema climatico attraverso il ciclo del carbonio, l'albedo della vegetazione e l'evapotraspirazione. Le foreste, ad esempio, assorbono anidride carbonica durante la fotosintesi, riducendo la

concentrazione di gas serra nell'atmosfera. Tuttavia, la deforestazione rilascia carbonio immagazzinato e altera il bilancio energetico locale e globale.

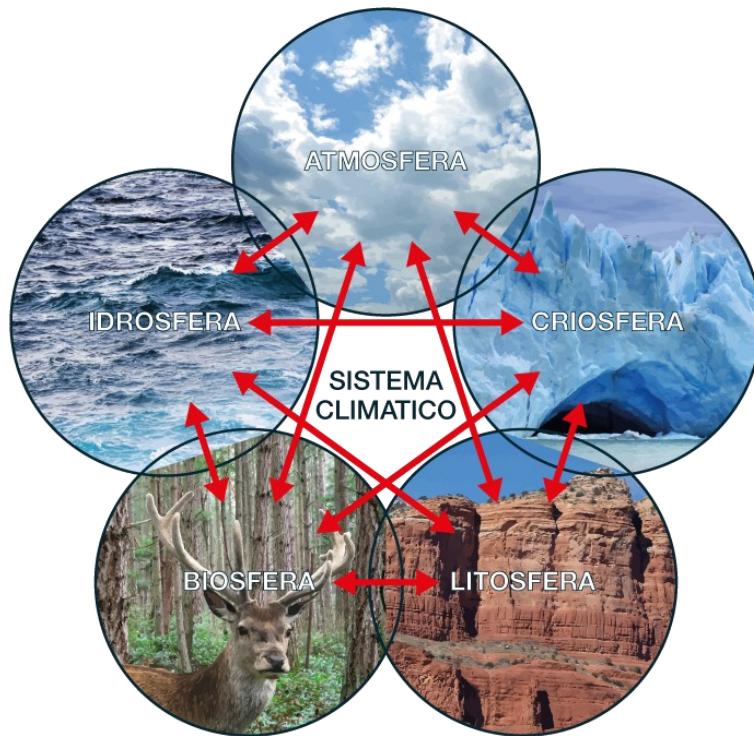


Fig. 2.1: Interazioni tra le diverse sfere: Il sistema climatico è un sistema complesso in cui le diverse sfere interagiscono tra di loro. *Fonte: [Tibone F. \(2021\)](#)*

Tutte le possibili interazioni rendono il sistema estremamente complesso e dalla dinamica non lineare; inoltre, a queste interazioni si aggiungono diverse forzanti esterne, che possono essere di origine naturale o antropica e che influenzano il comportamento del sistema climatico. È quindi fondamentale identificare le forzanti esterne, ovvero quei fattori esterni al sistema che inducono cambiamenti climatici, e analizzare in che modo abbiano influenzato il sistema nelle epoche climatiche passate e recenti. In particolare:

- le forzanti naturali includono, ad esempio, le variazioni nella radiazione solare che raggiunge la Terra o la quantità di particolato atmosferico rilasciato dalle eruzioni vulcaniche;
- le forzanti di origine antropica, invece, comprendono le modifiche nelle concentrazioni di gas serra causate dalle attività umane, la presenza di inquinanti atmosferici, il tasso di deforestazione e i cambiamenti nell'uso del suolo.

Il sistema climatico risponde a queste forzanti alterando il proprio comportamento e ciò non consente una rappresentazione modellistica unica e definitiva.

Poiché è impossibile riprodurre in un laboratorio reale l'intera complessità dell'atmosfera o del sistema climatico globale, si ricorre a modelli matematici implementati su calcolatori che fungono da laboratori virtuali e consentono la ricerca

di un'approssimazione sempre più accurata (Goosse et al., 2010). In particolare, per far fronte a diversi tempi di predicitività esistono diversi modelli climatici, la cui generalizzazione può essere ottenuta considerando una forma piuttosto generale di un insieme di equazioni alle derivate parziali. Questo ci permette di definire una formulazione concettuale di un modello climatico (Ruggeri, 2023-2024):

$$M \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + L\mathbf{u} + N(\mathbf{u}, \mathbf{u}) = \mathbf{F}, \quad (1)$$

dove:

- \mathbf{u} è il vettore che definisce lo stato del sistema climatico in un dato momento. A seconda della formulazione specifica del sistema e del modello che lo descrive, la dimensione del vettore \mathbf{u} può variare sostanzialmente; infatti, per un semplice modello di bilancio energetico globale \mathbf{u} , è ridotto a una quantità scalare, mentre per i modelli più complessi può arrivare fino a 10^9 variabili.
- $M\partial\mathbf{u}/\partial t$ prende in considerazione il fatto che si tratta di un sistema non stazionario;
- $L\mathbf{u}$ è il termine lineare;
- $N(\mathbf{u}, \mathbf{u})$ è il termine che prende in esame una proprietà intrinseca e importante delle dinamiche climatiche, la non-linearità. Questa caratteristica introduce un'accoppiamento nell'ampia gamma di scale del sistema climatico e può portare a equilibri multipli e comportamenti caotici, rendendo difficile o praticamente impossibile la separazione del sistema in un aggregato gestibile di sottoinsiemi. Ad esempio, il comportamento caotico porta a un errore che cresce nel tempo, mentre per l'accoppiamento delle scale spazio-temporali, gli errori su piccole scale si ritrovano anche su scale più grandi;
- \mathbf{F} tiene conto delle forzanti del sistema, sia naturali che antropiche.

I diversi modelli variano considerevolmente per scala spaziale, scala temporale e per la complessità dei processi rappresentati, adattandosi così a diverse esigenze di ricerca; una delle categorie più importanti e conosciute è quella dei modelli di circolazione generale (General Circulation Models - GCM), utilizzati per simulare l'intera atmosfera e gli oceani del pianeta a scale globali (IPCC, 2013; IPCC, 2021). I GCM sono modelli complessi e computazionalmente intensivi, che suddividono la Terra in un reticolo tridimensionale composto da celle di dimensioni variabili, generalmente di diverse decine o centinaia di chilometri. All'interno di ciascuna cella, il modello calcola l'evoluzione nel tempo di parametri climatici fondamentali come temperatura, umidità, velocità del vento e pressione atmosferica (vedi Fig. 2.2).

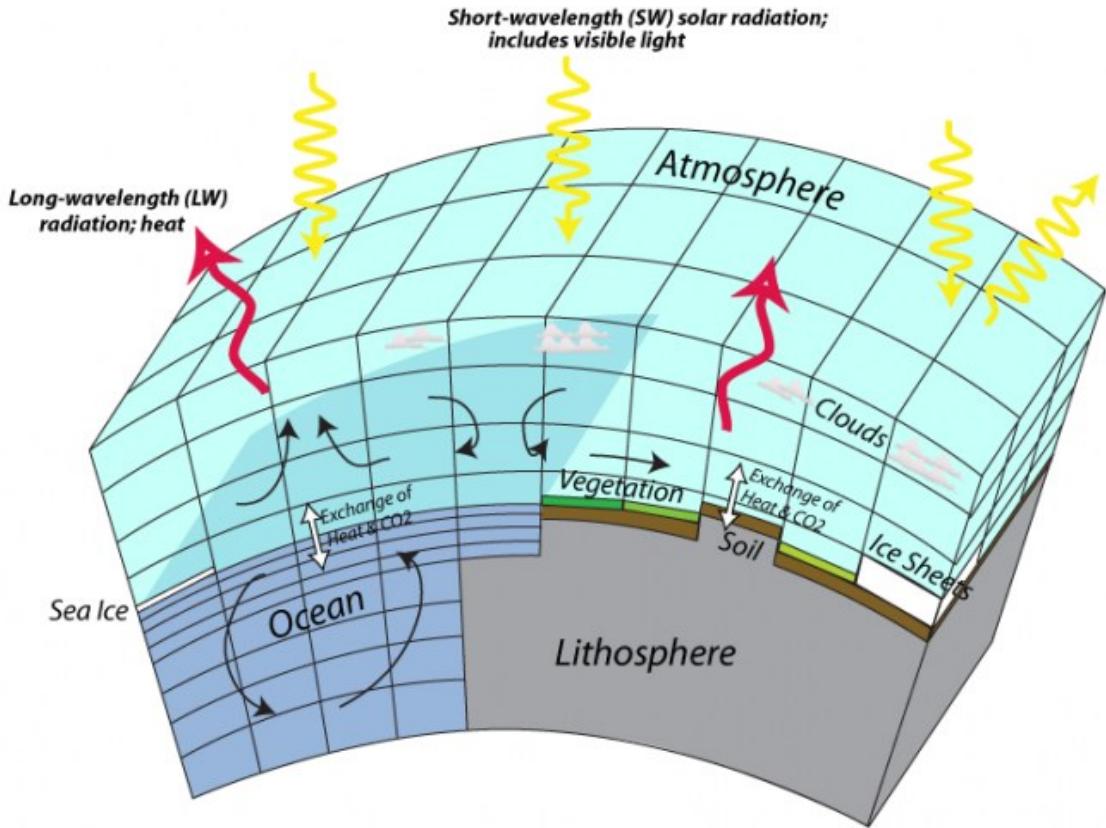


Fig. 2.2: Suddivisione del pianeta Terra in un GCM.

Il numero di riquadri della griglia in ciascuno dei componenti determina la risoluzione spaziale del modello.

Fonte: [Bralower & Bice](#)

Per i modelli di circolazione generale ad alta complessità, l'equazione (1) è un insieme di equazioni alle derivate parziali che non può essere risolto analiticamente; pertanto, i GCM vengono integrati numericamente. Sebbene l'errore di discretizzazione sia generalmente ben gestito in questi modelli, la bassa risoluzione rappresenta un problema che limita l'accuratezza di tali modelli e porta a incertezze difficilmente quantificabili (Stone & Risbey, 1990). Per enfatizzare l'introduzione della discretizzazione numerica spaziale, si può introdurre un nuovo vettore di stato Φ e un insieme di operatori M_n , N_n , L_n , F_n tali che:

$$M_n \frac{\partial \Phi}{\partial t} = M \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \quad (2)$$

e, in modo analogo, $L_n \rightarrow L$, $N_n \rightarrow N$ e $F_n \rightarrow F$.

In questo modo, l'equazione (1) diventa:

$$M_n \frac{\partial \Phi}{\partial t} + L_n \Phi + N_n(\Phi, \Phi) = F_n. \quad (3)$$

In un GCM, queste equazioni vengono risolte numericamente in ogni cella dello spazio discreto aggiornando lo stato del sistema a intervalli di tempo successivi (passi discreti), mentre ciascuna cella si scambia informazioni con quelle adiacenti,

ad esempio sul trasporto di massa d'aria da una cella a quella vicina. Questo formalismo garantisce che il modello abbia una corrispondenza consistente con il mondo reale: ogni output del modello (ad es. "temperatura media a 2 metri" in una certa regione) è interpretabile nella stessa unità fisica di una temperatura realmente osservata, permettendo il confronto tra simulazioni e dati empirici (Wallace & Hobbs, 2006). Va sottolineato, tuttavia, che esistono anche aspetti più sottili nella corrispondenza modello-realtà: ad esempio, alcune variabili modellistiche sono intermedie di quantità difficili da misurare direttamente (come i parametri di nube che rappresentano distribuzioni di goccioline). Su questi temi è intervenuta anche la filosofa della scienza Gramelsberger (2011), che si è chiesta che cosa rappresentano realmente i modelli numerici climatici, evidenziando come la traduzione di un modello matematico continuo in un algoritmo discreto implichi scelte circa quali grandezze fisiche inserire e come rappresentarle.

Nonostante la loro ampia diffusione, i GCM presentano alcuni limiti intrinseci, come la difficoltà nel rappresentare processi su piccola scala e fenomeni regionali, quali, ad esempio, il comportamento delle nuvole, le tempeste locali o la dinamica specifica di una regione montuosa. Per superare queste limitazioni, vengono utilizzati modelli climatici regionali (Regional Climate Models - RCM). Tali modelli si focalizzano su regioni più circoscritte, utilizzando informazioni di output dei modelli globali per definire condizioni al contorno. Ciò permette di ottenere simulazioni più dettagliate e accurate dei fenomeni locali, con risoluzioni spaziali che possono arrivare anche a pochi chilometri quadrati.

Un'altra categoria rilevante di modelli climatici è quella dei modelli di sistema Terra (Earth System Models - ESM), che non si limitano a considerare l'atmosfera e gli oceani, ma integrano al loro interno componenti più sofisticate legate alla biosfera, alla criosfera (come i ghiacciai e le calotte glaciali), alla geosfera (processi geologici e interazioni con le rocce e il suolo) e ai cicli chimici globali, come il ciclo del carbonio o del metano. L'obiettivo degli ESM è rappresentare in modo più realistico e completo la complessità dei feedback che regolano il sistema climatico terrestre, per prevedere in maniera più accurata come il clima risponderà alle forzanti antropogeniche, come l'aumento delle emissioni di gas serra e la deforestazione.

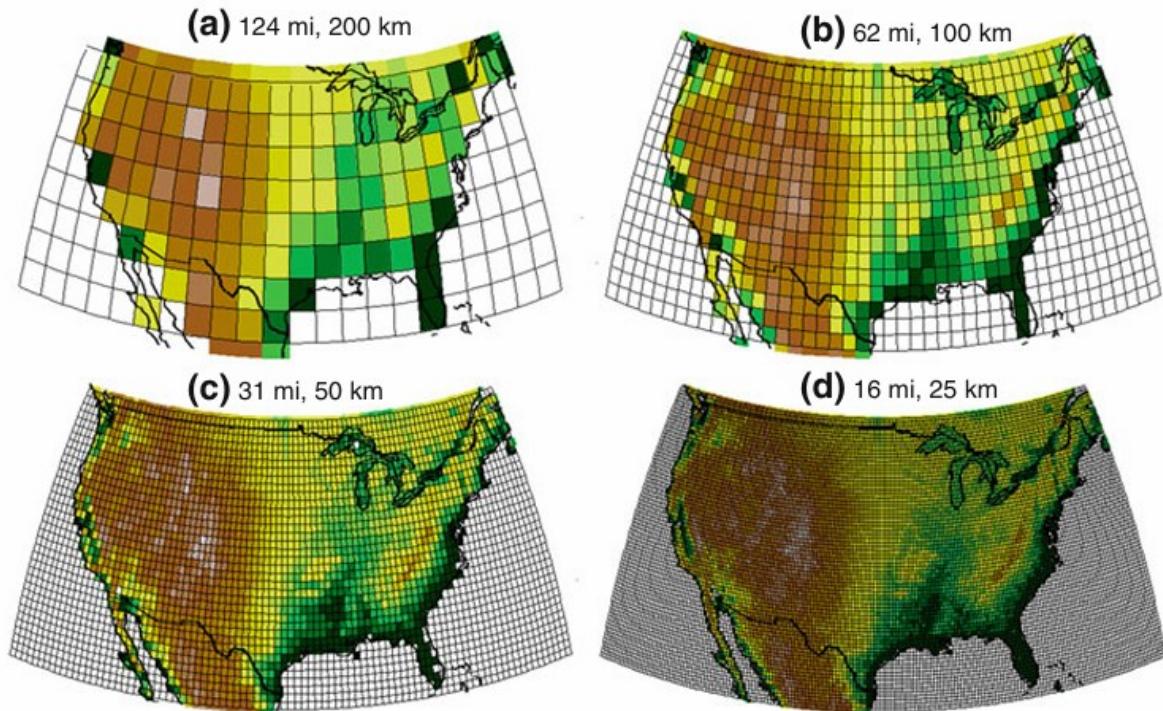


Fig. 2.3: Differenti scale risolutive nei modelli climatici.

Fonte: Gettelman, A., & Rood, R. B. (2016)

Tutti questi modelli, indipendentemente dalla loro scala o dal livello di dettaglio, devono integrare un'ampia gamma di dati osservativi, raccolti attraverso satelliti, stazioni meteorologiche, boe oceaniche e molteplici altre fonti, per inizializzare e validare le simulazioni e correggere continuamente eventuali errori sistematici. Inoltre, la complessità reale del sistema climatico obbliga i modelli a introdurre necessariamente delle semplificazioni di fenomeni non direttamente risolvibili, attraverso parametrizzazioni che influenzano l'accuratezza e l'affidabilità dei risultati ottenuti. Ciò implica che, anche con un modello perfetto, l'osservazione e il modello possono differire a causa del rumore stocastico.

Date delle equazioni alle derivate parziali con certe condizioni iniziali, miriamo a prevedere delle nuove equazioni evolute nel tempo secondo le leggi che vengono implementate nel nostro modello, e la distribuzione delle previsioni climatiche può essere descritta dall'equazione di Liouville: data un'incertezza nelle condizioni iniziali, rappresentata da una funzione di densità di probabilità iniziale $\rho(x, 0) = f(x)$, l'equazione di Liouville fornisce lo sviluppo della funzione di densità di probabilità nel tempo. Per un sistema deterministico N-dimensionale

$$\frac{dx}{dt} = F(x) . \quad (4)$$

Con la condizione iniziale $x(0) = x_0$, la funzione di densità di probabilità è solitamente indicata da una densità $\rho(x, t)$, e l'equazione di Liouville si generalizza a

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{k=1}^N \frac{\partial \rho F_k}{\partial x_k} = 0 , \quad (5)$$

dove \mathbf{F} rappresenta il flusso delle variabili dinamiche e l'equazione descrive come una distribuzione iniziale di stati evolve nel tempo, fornendo una rappresentazione probabilistica dell'incertezza.

Se si semplifica la notazione dell'equazione (3) impostando $M=1$ e omettendo la n a pedice, si ottiene

$$\dot{\phi} + L\phi + N(\phi, \phi) = F . \quad (6)$$

Separando grandi e piccole scale con $\phi = \bar{\phi} + \phi'$, e applicando la media su grandi scale, l'equazione (6) diventa

$$\dot{\bar{\phi}} + L\bar{\phi} + \overline{N(\bar{\phi}, \bar{\phi})} + \overline{N(\phi', \phi')} = \bar{F} . \quad (7)$$

Ora si può approssimare $\overline{N(\bar{\phi}, \bar{\phi})} \approx -P(\bar{\phi}, \{\alpha\})$ e scrivere $F = F(\{\beta\})$, in modo da enfatizzare la dipendenza dalle grandi scale $\bar{\phi}$ e dal set di parametri $\{\alpha, \beta\} \equiv (a, b, c, \dots)$.

Una predizione climatica è quindi la soluzione del problema alle condizioni iniziali dato da

$$\begin{cases} \dot{\phi} + L\phi + N(\phi, \phi) = F(\{\beta\}) + P(\phi, \{\alpha\}) \\ \phi(t=0) = \phi_0 \end{cases} \quad (8)$$

dove è stata tolta la barra per semplificare la notazione.

L'incertezza derivante da dati iniziali imprecisi, da parametri semplificati o da assunzioni modellistiche rende necessaria una rappresentazione probabilistica e la generazione di ensemble (insieme di simulazioni) che esplorano condizioni e parametri iniziali leggermente diversi per produrre distribuzioni probabilistiche che riflettono una gamma di possibili risultati, piuttosto che singole previsioni deterministiche:

- l'*ensemble standard* permette di campionare l'incertezza stocastica considerando la sensibilità delle soluzioni del modello climatico alle condizioni

iniziali e fornendo un'ensemble di sviluppo climatico probabile. E' ottenuto generando un set di condizioni iniziali ϕ_0^k compatibili con le osservazioni e risolvendo per $k = 1, \dots, N$ il sistema

$$\begin{cases} \dot{\phi} + L\phi + N(\phi, \phi) = F(\{\beta\}) + P(\phi, \{\alpha\}) \\ \phi(t = 0) = \phi_0^k \end{cases} \quad (9)$$

dove N rappresenta la dimensione dell'ensamble e le singole realizzazioni sono chiamate "elementi dell'ensamble".

- l'*ensemble di parametri perturbati* permette di campionare una componente dell'incertezza del modello dovuta alla scelta dei parametri. È ottenuto generando un set di parametri α_k compatibili con l'incertezza dovuta alle osservazioni e risolvendo il sistema

$$\begin{cases} \dot{\phi} + L\phi + N(\phi, \phi) = F(\{\beta\}^k) + P(\phi, \{\alpha\}^k) \\ \phi(t = 0) = \phi_0 \end{cases} \quad (10)$$

Variando i parametri fisici del modello entro limiti osservazionali, si quantifica l'incertezza associata alla scelta dei parametri nell'errore di rappresentazione della scala e nell'errore di rappresentazione del processo.

- l'*ensemble multi-modello* permette di confrontare i risultati di diversi modelli climatici per stimare l'incertezza derivante dalle diverse rappresentazioni fisiche e numeriche. Si ottiene eseguendo insiemi standard con un insieme di M modelli definiti da diversi operatori e parametri.

$$\begin{cases} \dot{\phi} + L^i\phi + N^i(\phi, \phi) = F^i(\{\beta\}) + P^i(\phi, \{\alpha\}) \\ \phi(t = 0) = \phi_0 \end{cases} \quad (11)$$

con $i = 1, \dots, M$. Questo ensemble è, in linea di principio, rappresentativo dell'incertezza generata da tutte le fonti di errore del modello. Infatti, il confronto tra diverse simulazioni prodotte da modelli differenti permette di quantificare in modo sistematico l'incertezza strutturale, valutando convergenze e divergenze nelle previsioni climatiche.

Dopo un certo lasso di tempo, l'incertezza sugli stati iniziali porta a un errore molto grande sulla previsione finale; quindi, la maggior parte dei modelli che studiano il cambiamento climatico sul lungo periodo fa principalmente affidamento su problemi alle condizioni al contorno (vedi Fig. 2.4).

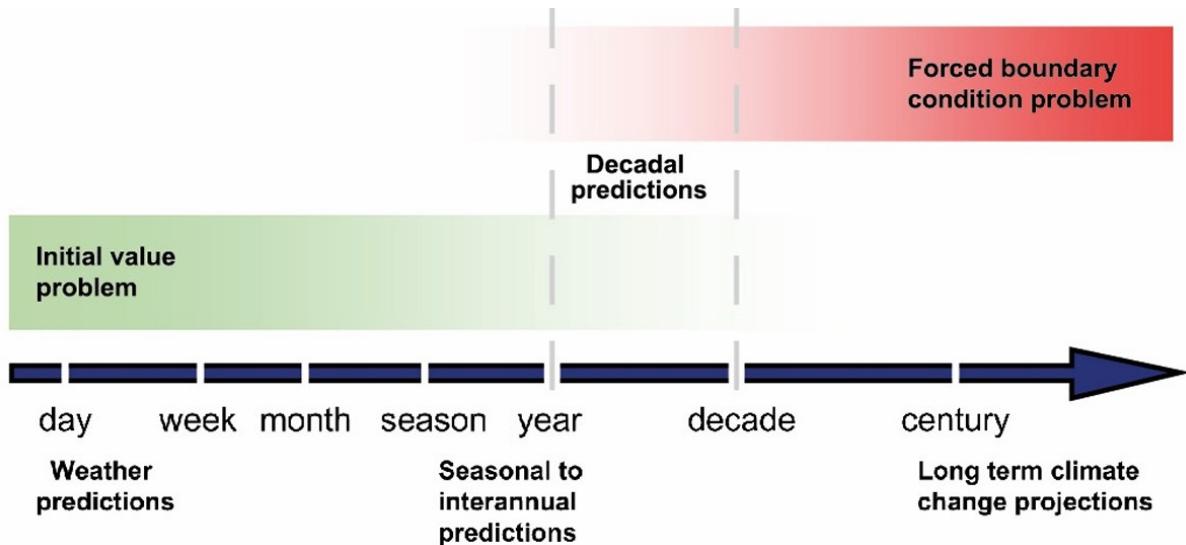


Fig. 2.4: Limiti di previsione dovuti a condizioni iniziali e forzanti future:

Le previsioni di interesse per il Decadal Climate Prediction Project procedono da un problema di condizione iniziale a scale temporali più brevi a un problema di valore limite forzato a scale temporali più lunghe. *Fonte: Kirtman et al., 2013.*

La costruzione dei modelli climatici è un processo complesso e iterativo, in cui scienziati e ricercatori selezionano, modificano e integrano diversi tipi di informazioni: dati osservativi, equazioni teoriche, assunzioni e parametrizzazioni, per produrre simulazioni che rispondano a specifiche domande climatiche (Gosse et al., 2010). Infatti, ogni modello climatico attuale rappresenta il risultato cumulativo di numerosi cicli di utilizzo e modifica, mirati ad aumentare la loro capacità di soddisfare specifiche esigenze e scopi scientifici o decisionali: tali scelte possono facilitare certe evoluzioni del modello, ma al contempo limitarne altre, stabilendo vincoli epistemici e metodologici difficili da modificare successivamente.

Questo approccio evidenzia l'importanza della storia dei modelli per il loro uso appropriato nel contesto presente: la conoscenza approfondita delle finalità originarie per cui erano stati costruiti, dei tipi di dati e delle metodologie di cui si è servito nel tempo, e delle modifiche successive apportate rappresenta un elemento chiave per valutarne correttamente l'adeguatezza agli scopi attuali. Questa consapevolezza storica permette agli utenti del modello (ricercatori, decisori politici, stakeholder) di comprendere meglio quali tipi di errori e distorsioni potrebbero essere presenti e come interpretare correttamente i risultati forniti dal modello stesso.

Nei GCMs, per ogni punto della griglia, sono fondamentali le osservazioni, che entrano nel ciclo di concezione del modello in tutte le diverse fasi, come possiamo notare dalla Fig. 2.5.

SVILUPPO DEL MODELLO

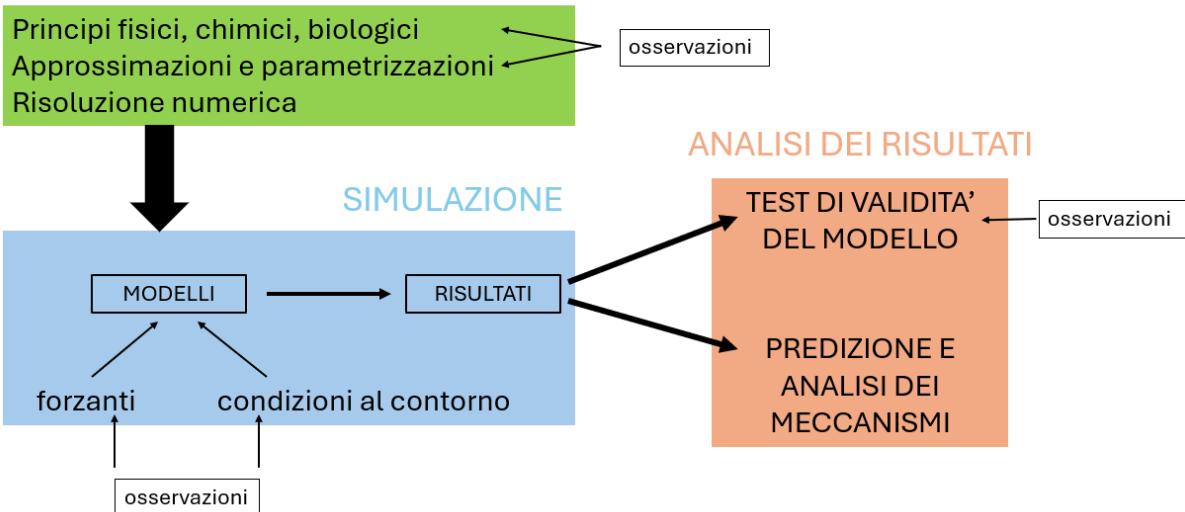


Fig. 2.5: Uso delle osservazioni: durante lo sviluppo servono a derivare parametri ed equazioni del modello; durante la simulazione servono a ricavare possibili forzanti e condizioni al contorno; infine, nella fase di analisi vengono usate per convalidare il modello.

Adattato dalle lezioni di Climatology di Ruggeri P. (2023-2024)

Per i GCMs a supporto della valutazione dell'IPCC, i cicli di sviluppo seguono i protocolli del cosiddetto *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP). L'obiettivo del CMIP è duplice: da una parte vuole rendere pubblicamente disponibile l'output multimodello in un formato standardizzato, dall'altra cerca di comprendere meglio i cambiamenti climatici passati, presenti e futuri derivanti da variabilità naturale e non forzata, o in risposta a cambiamenti nella forzante radiativa in un contesto multimodello (Eyring et al., 2016; IPCC, 2021). Questa comprensione include sia valutazioni delle prestazioni del modello durante un certo periodo storico, sia quantificazioni delle cause della distribuzione delle proiezioni future. Per aumentare la comprensione delle risposte del modello, vengono utilizzati anche esperimenti idealizzati, cioè esperimenti per studiare la predicitività del sistema climatico su varie scale temporali e spaziali, nonché per fare previsioni a partire dagli stati climatici osservati. Ad esempio, i modelli utilizzati dall'IPCC hanno una risoluzione compresa tra i 25 e i 250 km; ciò implica che risolvono la scala sinottica, ma non le scale meso e micro. Questo può apparire ragionevole per un modello che mira a simulare caratteristiche su larga scala del clima terrestre.

Vie parallele di sviluppo hanno portato a una serie di oltre 30 modelli con diverse scelte di parametrizzazione, risoluzione, schemi numerici e complessità. Questi devono essere validati e si può fare tramite il protocollo DECK (*Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima*). Al suo interno troviamo sia un controllo preindustriale (simulazioni di almeno 500 anni fino al 1850) che simulazioni storiche (dal 1850 a oggi):

- Nel primo caso, siamo in presenza di condizioni che non evolvono nel tempo, per cui la forzante, che viene scelta per essere rappresentativa del periodo precedente all'inizio dell'industrializzazione su larga scala, è considerata costante. In queste simulazioni si cerca di raggiungere un equilibrio con la forzante prescritta, comprendendo così il comportamento del clima terrestre in tali condizioni.
- Nel secondo caso, si fanno simulazioni del recente passato imponendo condizioni mutevoli coerenti con le osservazioni (la forzante usata varia nel tempo; vedi Fig. 2.6). Le simulazioni si basano su un'ampia gamma di misure strumentali di temperatura e permettono di studiare le prestazioni del modello rispetto al clima attuale e ai cambiamenti climatici osservati.

Validare i modelli permette poi di usarli per prevedere possibili scenari futuri: infatti, i modelli climatici sono utilizzati per studiare la risposta climatica a diverse politiche di mitigazione, per supportare decisioni sull'adattamento a livello regionale e per comprendere l'influenza delle attività umane sulle dinamiche climatiche (Weaver et al., 2013).

c The 'rising staircase'

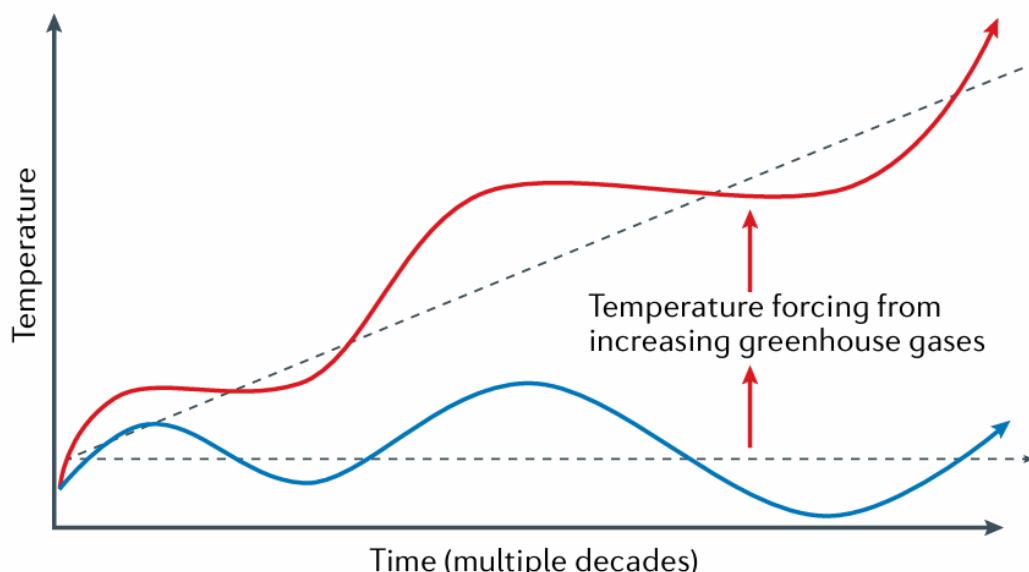


Fig. 2.6: Evoluzione della forzante radiativa: la forzante evolve nel tempo a causa dell'aumento della concentrazione dei gas-serra e questo, a sua volta, causa un aumento delle temperature medie. Fonte: Adattato da Purcell & Huddleston(2016)

2.2 Incertezze nella scienza del clima

La modellizzazione climatica è soggetta a numerose fonti di incertezza, che emergono in ogni fase della sua costruzione e applicazione. Per affrontare queste complessità, la letteratura scientifica ha proposto diverse tassonomie dell'incertezza (ad esempio, Kampourakis & McCain, 2019; Parker, 2010; Refsgaard et al., 2013; Regan et al., 2002; Shepherd, 2019).

Una distinzione, secondo me fondamentale e ormai consolidata, è quella tra incertezza epistemica e incertezza aleatoria (Kampourakis & McCain, 2019; Parker, 2010; Shepherd, 2019):

- **L'incertezza epistemica** è l'incertezza che deriva dai limiti delle nostre conoscenze o modelli. In altre parole, si assume che ci sia una sola verità oggettiva sul sistema in esame, ma gli scienziati non la conoscono completamente. Questa forma di incertezza è legata a fattori come l'incompletezza dei dati disponibili, l'inesattezza delle teorie o delle equazioni, o l'approssimazione delle condizioni al contorno. L'incertezza epistemica è, in linea di principio, riducibile: con ulteriori studi, dati migliori o modelli più accurati, possiamo sperare di diminuire questa incertezza (Kampourakis & McCain, 2019; Shepherd, 2019).
- **L'incertezza aleatoria** è l'incertezza dovuta alla variabilità intrinseca e al caso, inherente al sistema o al fenomeno. In questo caso, non c'è una singola verità deterministica da scoprire, poiché il sistema stesso ha un comportamento fondamentalmente casuale o caotico. Essendoci un elemento di casualità in ciò che avverrà, ad esempio a causa di rumore o caos interno al sistema, si può al massimo stimare una distribuzione di probabilità degli esiti (Hawkins & Sutton, 2009; Lorenz, 1963). Questa incertezza è considerata irriducibile in quanto nemmeno informazioni aggiuntive potrebbero eliminarla del tutto e, quindi, possiamo solo caratterizzarla meglio in termini probabilistici. Un esempio classico è il caso del lancio di un dado: anche conoscendo tutto ciò che è conoscibile sul dado e la forza del lancio, resterà una componente aleatoria nel risultato. Nei modelli climatici, un esempio di incertezza aleatoria è la variabilità interna del clima: fenomeni come El Niño o fluttuazioni caotiche nel sistema atmosfera-oceano introducono oscillazioni imprevedibili nel clima di un dato decennio, oscillazioni che non dipendono da carenze di conoscenza, ma dalla natura caotica del sistema (IPCC, 2021). Questa variabilità naturale fa sì che, ad esempio, non si possa prevedere con certezza assoluta quale sarà l'esatta temperatura media globale in un anno futuro – anche se conoscessimo

perfettamente la tendenza di riscaldamento – poiché c'è rumore interno nel sistema climatico. Tale incertezza aleatoria può essere descritta con metodi statistici, ma non può essere eliminata.

È importante sottolineare che nelle pratiche scientifiche le due forme di incertezza spesso coesistono e si intrecciano. Un dato modello può soffrire sia di incertezza epistemica (es. parametri sconosciuti) che di incertezza aleatoria (es. rumore nei dati sperimentali). Ad esempio, nei GCMs, quando si effettuano ensemble di simulazioni, le differenze tra un modello e l'altro includono sia differenze sistematiche dovute a diverse rappresentazioni dei processi fisici (incertezza epistemica tra modelli) sia differenze casuali dovute al diverso andamento della variabilità interna in ciascuna simulazione (incertezza aleatoria) (Baldissera Pacchetti et al, 2024).

Un approccio alternativo è stato introdotto da Regan e colleghi (2002), che distinguono tra incertezza epistemica e incertezza linguistica. Quest'ultima riguarda ambiguità semantiche e vaghezze terminologiche, sottolineando l'importanza della chiarezza nel linguaggio scientifico, soprattutto nella comunicazione dell'incertezza.

Una tassonomia più articolata è stata proposta da Refsgaard e colleghi (2013), che identificano tre dimensioni fondamentali: la natura dell'incertezza, il livello (da incertezza nulla a totale ignoranza) e la fonte (dati, modelli, contesto). Questa classificazione consente di tracciare l'incertezza nelle proiezioni climatiche, a partire dalla scelta degli scenari di emissione fino alla risposta dei sistemi locali.

Anche all'interno degli ultimi due cicli di rapporti IPCC (2015, 2023) possiamo notare diversi tipi di incertezza, come l'incertezza modellistica (strutturale e parametrica), la variabilità interna del sistema e l'incertezza di scenario (legata alle traiettorie socio-economiche future). Possiamo provare a ricondurre queste incertezze alla distinzione epistemica/aleatoria, notando che:

- la qualità e la completezza dei dati osservativi, spesso limitati o affetti da errori sistematici, impongono l'uso di interpolazioni ed estrapolazioni, che danno vita ad incertezze epistemiche;
- la risoluzione limitata dei modelli, sia spaziale che temporale, rende necessaria la parametrizzazione di processi fisici complessi, come la formazione delle nubi o le dinamiche oceaniche. A seconda di come i modelli rappresentano i processi fisici, chimici e biologici del sistema Terra, si formano delle incertezze che sono epistemiche, poiché con una migliore comprensione dei processi potremmo ridurle.
- le osservazioni utilizzate per validare i modelli possono essere affette da errori di misura che rientrano all'interno della famiglia delle incertezze epistemiche.
- il carattere caotico del sistema climatico comporta una variabilità interna irriducibile che rientra nella famiglia delle incertezze aleatorie.

Facciamo un esempio di incertezza climatica. Nella risposta del clima all'aumento della CO_2 (nota come incertezza sulla sensibilità climatica) c'è un'incertezza epistemica che fa sì che i modelli forniscano un intervallo di riscaldamento globale atteso per un dato scenario emissivo. Questa incertezza è dovuta a limiti nella conoscenza di alcuni processi di retroazione (feedback) nel sistema climatico, come il ruolo esatto delle nubi; progressi nella fisica delle nubi o migliori dati satellitari potrebbero restringere l'intervallo di sensibilità (ad esempio, distinguendo meglio le reazioni delle nubi alte e basse al riscaldamento). D'altro canto, i sistemi climatici sono sistemi complessi che, come scoprì Edward Lorenz (1963), a causa della loro estrema sensibilità alle condizioni iniziali, possono manifestare comportamenti imprevedibili nel tempo. Infatti, Lorenz osservò che anche una minima variazione nelle condizioni iniziali generava un'evoluzione del sistema completamente diversa, nonostante le simulazioni fossero governate da equazioni deterministiche.

Questo significa che, sebbene il sistema climatico sia deterministico, dopo un certo periodo il suo comportamento diventa caotico, apparendo di fatto casuale (parliamo quindi di caos deterministico). Visto il caos deterministico a cui è soggetto il sistema climatico, c'è un'incertezza aleatoria dovuta alla variabilità interna. Ciò significa che, anche se fissassimo un determinato scenario di emissioni e avessimo un modello perfetto, i risultati individuali di diverse simulazioni potrebbero divergere nei dettagli (ad esempio, un modello potrebbe simulare un periodo di temporaneo raffreddamento locale in Europa dovuto a una certa sequenza di oscillazioni oceaniche, mentre un altro modello – o un'altra esecuzione dello stesso modello – potrebbe non riprodurre esattamente quel pattern, pur seguendo entrambi lo stesso trend generale di riscaldamento). Questa è la ragione per cui gli scienziati usano insiemi (ensemble) di simulazioni climatiche: eseguendo molti run e variando leggermente le condizioni iniziali, si può campionare la distribuzione di probabilità degli esiti climatici futuri, isolando in parte l'incertezza aleatoria. In parallelo, confrontando i risultati provenienti da diversi modelli (sviluppati da gruppi indipendenti), si esplora l'incertezza epistemica legata alle diverse scelte modellistiche. Nel linguaggio dell'IPCC, si parla di approccio multi-modello per caratterizzare l'incertezza epistemica e di approccio probabilistico all'interno di ciascun modello per la componente aleatoria (Parker & Risbey, 2015).

Rimane fuori da questa dicotomia l'incertezza riguardo agli scenari futuri. Ad esempio, non sappiamo con certezza quali saranno le emissioni di gas serra nei prossimi decenni, poiché ciò dipende da scelte socio-economiche; questa è una forma di incertezza di scenario, a volte distinta dalle categorie epistemica e aleatoria, in quanto legata alle decisioni umane per il futuro. Su questo punto, Watson-Hernández e Guzmán-Arias (2025) concludono che l'incertezza nelle proiezioni del cambiamento climatico plasma e al contempo è plasmata da preoccupazioni epistemiche, metodologiche, etiche e politiche; pertanto, è necessario aggiungere un terzo tipo di incertezza, discusso anche da altri autori (come Dessai & Hulme, 2004; Kahneman & Tversky, 1982; Shepherd, 2019) e reso operativo in educazione

scientifica da Miani e colleghi (2024, 2025b): l'incertezza riflessiva. Essa rappresenta il ruolo umano nel modellare l'ambiente attorno a noi e mette in evidenza l'importanza delle decisioni quando si tratta del nostro futuro (Miani et al., 2025b). Rispetto agli altri tipi, la riflessiva non si riduce né a colmare lacune di conoscenza (epistemica) né alla variabilità intrinseca dei sistemi (aleatoria), ma dipende da scelte, comportamenti, istituzioni e negoziazioni che possono cambiare traiettorie tecnologiche, economiche e sociali e, quindi, gli esiti climatici e i parametri di rischio.

Quindi, il tema dell'incertezza nella modellistica climatica si intreccia con riflessioni istituzionali e sociologiche. Come mostrano Hulme e De Pryck (2023), i modelli climatici non devono essere intesi soltanto come strumenti tecnici di previsione, ma anche come dispositivi epistemici e sociali. Essi incarnano scelte metodologiche, semplificazioni e pratiche comunitarie che riflettono tanto le potenzialità quanto i limiti della scienza del clima. Hulme sottolinea come i modelli non possano mai rappresentare in modo esaustivo la complessità del sistema climatico perché le loro strutture matematiche e computazionali selezionano dimensioni della realtà ritenute salienti, mentre altre vengono trascurate o rese in forma semplificata. In questo senso, la modellistica si colloca in una tensione costante fra rigore scientifico, capacità predittiva e necessità di comunicazione.

Nonostante queste incertezze, il nucleo delle conoscenze sul cambiamento climatico resta robusto. Ad esempio, è certo che la Terra si stia riscaldando a causa dell'aumento dei gas serra di origine antropica (IPCC, 2023), ma è incerto di quanti gradi esattamente aumenterà la temperatura entro la fine del secolo per un dato scenario (IPCC, 2021), oppure come varieranno esattamente le precipitazioni in una specifica regione (IPCC, 2021). Lungi dall'invalidare l'intera teoria del cambiamento climatico, queste incertezze sui dettagli sono riconosciute dagli scienziati e comunicate insieme alle proiezioni (ad esempio, sotto forma di intervalli di confidenza o range nei rapporti IPCC). Anzi, come discusso precedentemente, proprio il riconoscimento di tali incertezze spinge la comunità scientifica a raffinare continuamente i modelli climatici. Un esempio storico è l'evoluzione delle proiezioni dall'IPCC: già nel primo Rapporto di Valutazione IPCC (1990), si indicava un range plausibile di riscaldamento globale al raddoppio della CO₂; trent'anni dopo, nel Syntesys Report del 2023, che riassume il ciclo di rapporti più recente, quel range è stato leggermente rivisto alla luce di nuovi studi, con incertezze in parte ridotte (ad esempio, nel Synthesis Report del 2023 è aumentata la confidenza che la sensibilità climatica sia compresa tra circa 2,5 e 4 °C). Ciò dimostra il progressivo affinarsi della conoscenza, pur nella persistenza di un margine di incertezza inevitabile.

Da un punto di vista epistemologico, la climatologia esemplifica bene il ruolo produttivo dell'incertezza: anche se questa non ha impedito di raggiungere un consenso su molti aspetti del clima, ha reso la comunicazione verso il pubblico più complessa, in quanto una comprensione adeguata della scienza da parte del pubblico richiede di imparare a convivere con l'incertezza, senza considerarla un

difetto fatale, ma un elemento naturale del processo scientifico (Baldissera Pacchetti et al., 2024; Parker, 2010). Nel caso del clima, ciò è particolarmente importante perché se il pubblico o i decisori politici cadono nell'equivoco di credere che "incertezza" significhi "ignoranza" o "disaccordo totale", potrebbero sottovalutare l'urgenza di affrontare il problema. Riconoscere questa realtà permette di avere fiducia informata nella scienza del clima nonostante la consapevolezza dell'esistenza di margini di errore e della necessità di ulteriori studi per dettagliare scenari regionali, possibili tipping points, ecc.

In conclusione, la distinzione tra i diversi tipi di incertezza aiuta a chiarire la natura dell'incertezza nei modelli climatici, e l'epistemologia dell'incertezza mostra come la scienza del clima venga stimolata a progredire. Questo crea però nuove sfide comunicative e decisionali, soprattutto quando le decisioni politiche devono essere prese prima che alcune incertezze possano essere completamente ridotte. Per questo motivo, nel prossimo capitolo sposteremo lo sguardo sulla comunicazione delle incertezze verso i decisori politici.

Capitolo 3 - Incertezza come oggetto di riflessione all'interno dell'IPCC

L'incertezza diventa un tema particolarmente critico quando la scienza informa le decisioni politiche su questioni urgenti e complesse come il cambiamento climatico. L'IPCC ha dedicato grande attenzione a come concettualizzare e comunicare le incertezze legate ai propri risultati; infatti, nei suoi rapporti, ha sviluppato un articolato framework dell'incertezza che combina valutazioni qualitative di confidenza e stime quantitative di probabilità, nel tentativo di fornire ai decisori politici informazioni attendibili sui rischi climatici e sul grado di certezza con cui tali informazioni sono note. Tuttavia, questo sforzo ha sollevato questioni filosofiche ed epistemologiche di rilievo: su quali assunzioni si basa tale quadro? È veramente efficace nel rappresentare la natura dell'incertezza scientifica? Inoltre, dal punto di vista comunicativo, rimane aperto il problema di come i decisori e il pubblico interpretino termini come "likely" (probabile) o "high confidence" (alta confidenza), e se semplificazioni o scelte linguistiche possano generare fraintendimenti o decisioni inadeguate.

In ambito scientifico, abbiamo già visto come l'incertezza non equivalga a ignoranza o mancanza di rigore, ma rappresenti il margine di indeterminazione che accompagna inevitabilmente ogni misurazione, teoria o previsione. Proprio il lavoro di esplicitare limiti, errori e alternative è ciò che permette alla scienza di avanzare e di rendere più robusti i propri risultati (Covitt & Anderson, 2022; Kampourakis & McCain, 2019; Rosenberg et al., 2022). Nella percezione pubblica, però, questa idea è tutt'altro che scontata: in un immaginario ancora legato a una scienza che "fornisce certezze", la presenza di margini di errore, dibattiti o revisioni viene spesso letta come segno di inaffidabilità o incompetenza (Shepherd & Lloyd, 2021). Le pratiche educative tradizionali, che privilegiano il sapere finito rispetto ai processi e alla gestione dell'incertezza (Chen et al., 2019), e i contesti post-normali in cui si chiedono risposte univoche nonostante la complessità dei problemi (Funtowicz & Ravetz, 2022), rafforzano questa aspettativa di certezza. Questo scarto percettivo viene poi sistematicamente sfruttato da movimenti antiscientifici: i negazionisti del cambiamento climatico, ad esempio, hanno enfatizzato per anni le incertezze sui ritmi e su alcuni meccanismi del riscaldamento per mettere in dubbio l'intero consenso sul global warming antropogenico, così come gli anti-vaccinisti o i creazionisti estrapolano singole incertezze per suggerire che gli scienziati "non sappiano di cosa parlano".

Nel caso del clima, però, è cruciale distinguere tra ciò che è incerto nei dettagli e ciò che è ormai stabilito con altissimo livello di confidenza. L'incertezza riguarda, ad esempio, l'entità esatta del riscaldamento futuro per un dato scenario emissivo, la sensibilità climatica o il tasso preciso di innalzamento del livello del mare; non

riguarda il fatto che il sistema climatico si stia scaldando, che il livello del mare stia aumentando e che i gas serra di origine antropica siano la causa dominante di queste tendenze. Comunicare efficacemente l'incertezza significa allora chiarire che i margini di incertezza sfumano i dettagli senza intaccare il quadro generale.

È sullo sfondo di questa tensione tra epistemologia scientifica (che integra l'incertezza nel proprio modus operandi) ed aspettativa sociale di certezza che si colloca il lavoro dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). L'IPCC non produce ricerca originale, ma elabora grandi rapporti di valutazione (Assessment Reports) che sintetizzano lo stato delle conoscenze sul clima e i relativi rischi, affiancati da rapporti speciali su temi specifici e da linee guida metodologiche. I rapporti principali sono articolati in tre Working Group: il Working Group I (WGI) tratta le basi fisiche del sistema climatico; il Working Group II (WGII) analizza impatti, vulnerabilità e adattamento; il Working Group III (WGIII) si occupa di mitigazione. Ogni gruppo si rivolge a un pubblico misto: comunità scientifica e tecnica, ma anche decisori politici e società civile, soprattutto attraverso i Summary for Policymakers (SPM) e, a livello più integrato, il Synthesis Report, dove viene utilizzato un linguaggio calibrato per esprimere in modo coerente e trasparente livelli di confidenza e gradi di probabilità. Nella sezione successiva vedremo come, all'interno di questo quadro, l'IPCC abbia sviluppato un vero e proprio "framework dell'incertezza" per trattare in modo sistematico e consistente le diverse sorgenti di incertezza nelle proprie valutazioni.

3.1 Il framework dell'IPCC per l'incertezza nei rapporti sul clima

Fin dalla sua istituzione nel 1988, l'IPCC ha riconosciuto che fornire ai decisori politici una valutazione equilibrata del "current state of knowledge" sul clima implica necessariamente dar conto anche di ciò che non è conosciuto con certezza.

Pertanto, l'IPCC ha progressivamente elaborato un framework formale per rappresentare l'incertezza, esplicitato nelle sue Guidance Notes per gli autori principali dei rapporti prodotti a partire dal AR5 (Mastrandrea et al., 2010). L'ultima versione matura di tale framework – utilizzata nei Rapporti di Valutazione Quinto (AR5) e Sesto (AR6) – si basa su due strumenti complementari:

1. Una valutazione qualitativa, detta *confidence*, che si riferisce al grado di fiducia nella validità di una determinata affermazione scientifica. Esso viene espresso qualitativamente attraverso una scala che include cinque livelli: molto alto, alto, medio, basso e molto basso. Tale classificazione non implica una misurazione probabilistica, bensì riflette il grado di accordo e la forza dell'evidenza disponibile, studiata attraverso quattro categorie differenti: la tipologia (comprensione meccanicistica, teoria, dati, modelli, giudizi degli esperti), la quantità (non viene definita in modo univoco, ma può riferirsi al

numero di osservazioni disponibili, al numero di modelli o simulazioni effettuate e/o al numero di studi rilevanti), la qualità (si riferisce, per esempio, alla precisione e affidabilità dei dati e alla validità dei modelli, misurata sulla base delle prestazioni empiriche o della correttezza delle assunzioni) e la coerenza delle prove scientifiche disponibili (viene definita nel lavoro di Mastrandrea e colleghi (2010) come “la misura in cui le evidenze supportano una o più spiegazioni alternative dello stesso fenomeno, o la misura in cui le proiezioni future sono tra loro simili o divergenti”).

L'evidenza può essere classificata come robusta, media o limitata, in base alla presenza di linee di prova indipendenti e consistenti e alla qualità intrinseca dei dati utilizzati; l'accordo, invece, può essere alto, medio o basso, a seconda del grado di concordanza tra diversi studi, modelli o interpretazioni scientifiche. La guida non fornisce una definizione tecnica di “accordo”, ma l'articolo di Mastrandrea offre due interpretazioni: accordo come consenso nella comunità scientifica su un certo risultato e accordo come grado di compatibilità tra il risultato e diverse spiegazioni scientifiche (consolidate, speculative o concorrenti). All'apparenza, queste due definizioni potrebbero sembrare in contrasto, ma si possono riconciliare assumendo che il consenso scientifico emerge proprio quando le spiegazioni supportate dalle evidenze sono simili e ben consolidate.

Nella pratica, gli autori IPCC utilizzano spesso il termine “*agreement*” come coerenza tra studi o modelli (es. “elevato accordo tra le analisi” → fiducia alta) e talvolta come consenso epistemico (es. “assenza di consenso nella comunità scientifica” → fiducia bassa). Inoltre, la guida prevede che evidenza e accordo vengano combinati per assegnare il livello finale di confidence, come possiamo vedere nella Tabella 3.1:

	Basso Accordo	Medio Accordo	Alto Accordo
Evidenza Robusta	Medium Confidence	High Confidence	Very High Confidence
Evidenza Media	Low Confidence	Medium Confidence	High Confidence
Evidenza Limitata	Very Low Confidence	Low Confidence	Medium Confidence

Tabella 3.1: Matrice qualitativa proposta dall'IPCC per combinare il livello di evidenza (limitata, media, robusta) e il grado di accordo (basso, medio, alto) nella definizione del livello complessivo di *confidence* associato a una data affermazione (adattato da Mastrandrea et al., 2010, 2011).

Nella prima colonna ci sono i tre livelli di *evidence*, in ordine crescente dal basso verso l'alto; nella prima riga possiamo invece notare i tre livelli di accordo, in ordine crescente da sinistra verso destra. Il livello di *confidence*

viene quindi definito in modo integrato valutando queste due dimensioni e riflette una sintesi qualitativa delle incertezze epistemiche associate a un'affermazione.

- Il concetto di *likelihood*, invece, ha un carattere quantitativo e indica la probabilità stimata che un certo evento o risultato si verifichi. Il termine *likelihood*, secondo il framework IPCC, è espresso utilizzando specifici intervalli probabilistici definiti in maniera esplicita: virtualmente certo (99–100%), estremamente probabile (95–100%), molto probabile (90–100%), probabile (66–100%), più probabile che non (50–100%), circa probabile quanto non probabile (33–66%), improbabile (0–33%), molto improbabile (0–10%), estremamente improbabile (0–5%) e eccezionalmente improbabile (0–1%). In altre parole, il concetto di *likelihood* permette di assegnare una misura precisa dell'incertezza rispetto a particolari eventi futuri o passati. Ad esempio, affermazioni come "È praticamente certo che gli estremi di caldo (comprese le ondate di calore) sono diventati più frequenti e più intensi nella maggior parte delle regioni terrestri a partire dagli anni '50" (IPCC, 2023, p. 61) implicano una probabilità tra il 99% e il 100% che tale affermazione sia corretta.

Secondo la guida, le probabilità possono derivare da due fonti principali: analisi (statistiche e modellistiche) e giudizi degli esperti. Nel primo caso si stanno considerando la generazione e l'analisi di serie temporali relative a una variabile climatica (ad esempio, la temperatura media globale) per un certo periodo (es. 1980–2050) e tali serie possono provenire da uno o più modelli climatici. L'insieme dei giudizi degli esperti invece deriva da una raccolta e una sistematizzazione del grado di credenza soggettivo degli esperti rispetto a determinati valori o intervalli. Sono usate soprattutto per acquisire la metaconoscenza degli esperti, cioè le loro opinioni sui limiti dei modelli climatici, sulla qualità dei dati osservativi, e sulle lacune nella teoria.

Consideriamo tre esempi tratti dal Synthesis Report del 2023. In ciascuno, vengono utilizzati termini di *confidence*, di *likelihood*, o entrambi:

- Solo *confidence*: "*Human activities, principally through emissions of greenhouse gases, have unequivocally caused global warming, with global surface temperature reaching 1.1°C above 1850–1900 in 2011–2020. [...] (high confidence)*" (IPCC, 2023, p. 4)
- Solo *likelihood*: "*The likely range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–2019 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. Over this period, it is likely that well-mixed greenhouse gases (GHGs) contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C [...]*" (IPCC, 2023, p. 5.)

- Entrambe: "*Human influence was very likely the main driver of these increases since at least 1971. Evidence of observed changes in extremes such as heatwaves, heavy precipitation, droughts, and tropical cyclones, and, in particular, their attribution to human influence, has further strengthened since AR5. Human influence has likely increased the chance of compound extreme events since the 1950s, including increases in the frequency of concurrent heatwaves and droughts (high confidence).*" (IPCC, 2023, p. 6)

I termini di *confidence* e *likelihood* esprimono lo stesso tipo di informazione o no? I documenti di supporto dell'IPCC non forniscono una risposta chiara e, se da una parte gli autori dell'IPCC sembrano lasciare aperte entrambe le interpretazioni (pur tra di loro incompatibili), dall'altra applicano prevalentemente l'interpretazione non-sostitutiva. Infatti, nell'ultimo esempio, la frase utilizza sia la *likelihood* ("very likely", "likely") che la *confidence* ("high confidence") per caratterizzare aspetti diversi della stessa affermazione: *likelihood* si riferisce alla probabilità che l'influenza umana sia la causa principale ("very likely") o abbia aumentato le probabilità di eventi estremi ("likely"), mentre la *confidence* valuta la robustezza e il consenso delle evidenze disponibili ("high confidence"). Questo indica che *confidence* e *likelihood* non sono intercambiabili, perché misurano dimensioni diverse dell'incertezza, e quindi vengono considerate informazioni complementari, non semplici alternative: la *likelihood* si applica tipicamente a variabili quantificabili (ad esempio "il riscaldamento globale supererà 1.5°C entro il 2040"), dove c'è una base statistica o modellistica per stimare una probabilità; la *confidence*, invece, si applica anche a dichiarazioni non facilmente quantificabili in termini probabilistici, riflettendo la valutazione soggettiva degli autori sull'affidabilità complessiva di quella conclusione.

La Guida Unificata per AR5 (Mastrandrea et al., 2010) e il suo aggiornamento in AR6 hanno fornito agli scienziati istruzioni dettagliate su quando e come applicare i termini di incertezza. Ad esempio, dalla guida AR5 si raccomanda di usare i livelli di confidenza per qualunque affermazione significativa, ma di esprimere anche una probabilità numerica solo se la confidenza nel risultato è almeno alta, per evitare di dare un falso senso di precisione numerica in casi in cui la base conoscitiva è debole ("assign likelihood or probability for that range when possible; otherwise only assign confidence", p.4). Inoltre, si sconsiglia di fare somme algebriche di incertezze eterogenee: l'incertezza totale di un certo risultato complesso va valutata globalmente, piuttosto che combinando meccanicamente gli errori di ogni componente, richiedendo dunque un giudizio esperto.

Questo linguaggio calibrato è stato concepito per assicurare coesione e chiarezza nell'esposizione visto che un obiettivo esplicito era quello di ridurre le discrepanze presenti in passato tra diversi capitoli o gruppi: ad esempio, nel Fourth Assessment Report (2007) furono riscontrate diverse inconsistenze nell'uso di termini d'incertezza, con autori di sezioni differenti che assegnavano significati non uniformi a espressioni come "likely" o "confidence". (Adler & Hirsch Hadorn, 2014; Aven &

Renn, 2015; De Pryck & Hulme, 2022; InterAcademy Council, 2010; Jonassen & Pielke, 2011; Mastrandrea & Mach, 2011)

In pratica, a livello di Working Group, Aven e Renn (2015), analizzando il ciclo di rapporti AR5, hanno osservato che c'era una chiara non uniformità nell'uso di *confidence* e *likelihood* tra i diversi Working Groups: il WG I ha fatto ricorso soprattutto alla *likelihood*, il WG II ha combinato *confidence* e *likelihood*, mentre il WG III ha utilizzato prevalentemente qualificatori qualitativi, non probabilistici, dell'incertezza.

3.1.1 Esempi dal Sesto Rapporto di Valutazione (AR6)

Per comprendere concretamente l'applicazione di questo framework anche nel più recente ciclo di rapporti, l'AR6, abbiamo esaminato alcuni esempi tratti dal Summary for Policymakers (SPM) del Working Group I (WGI) – dedicato alle basi fisiche del clima. La primissima affermazione del SPM dichiara:

"It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land".
(IPCC, 2021, p.4)

L'uso del termine *"unequivocal"* (inequivocabile) è significativo: l'IPCC qui rinuncia a qualunque qualificatore probabilistico, comunicando di fatto certezza totale su questa affermazione fondamentale. Si tratta di un rafforzamento rispetto al rapporto precedente (AR5, 2013) che diceva che il riscaldamento osservato era *"extremely likely"* dovuto alle attività umane (cioè $\geq 95\%$ di probabilità). Nel 2021 gli scienziati IPCC hanno ritenuto che le evidenze fossero talmente schiaccianti da poter parlare di fatto acquisito senza ombra di dubbio. Questo cambio di linguaggio – da *"estremamente probabile"* a *"inequivocabile"* – riflette non solo nuovi dati (ad es. un ulteriore riscaldamento osservato e una miglior comprensione di attributi causali) ma anche un'esigenza comunicativa: evitare qualsiasi fraintendimento da parte dei decisori sul fatto che il riscaldamento globale in atto sia attribuibile all'essere umano. In questo caso, l'eliminazione dell'indicatore di incertezza serve a non lasciare spazio narrativo ai negazionisti o ai dubiosi sull'origine antropica del cambiamento climatico.

Il SPM dell'AR6 prosegue con altre dichiarazioni accompagnate da livelli di *confidence*. Ad esempio:

"Global mean sea level has risen faster since 1900 than over any preceding century in at least the last 3000 years (high confidence)".
(IPCC, 2021, p.8)

Qui la frase conclusiva *"high confidence"* segnala che gli autori sono molto confidenti nell'affermazione che il livello medio globale del mare è aumentato più rapidamente

dal 1900 che in qualsiasi altro secolo precedente negli ultimi 3000 anni. Ciò implica che la base dell'affermazione – tra cui i modelli di dinamica delle calotte glaciali – è considerata robusta e concorde.

Un altro esempio è:

“The very likely range of equilibrium climate sensitivity is between 2°C (high confidence) and 5°C (medium confidence). The AR6 assessed best estimate is 3°C with a likely range of 2.5°C to 4°C (high confidence)”
 (IPCC, 2021, p.11)

Questo passaggio comunica che la sensibilità climatica di equilibrio (l'aumento di temperatura atteso raddoppiando la CO_2) è stimata molto probabilmente tra 2.5 e 4.0°C, con stima centrale a 3.0°C. Notiamo il termine “*likely range*” – quindi circa 66-100% di probabilità che il valore vero stia in quell'intervallo – e il riferimento esplicito a “*multiple lines of evidence*”. In effetti, l'AR6 ha ridotto l'incertezza rispetto all'AR5 (che dava un range 1.5–4.5°C) grazie a nuovi studi sulle nubi (Ceppi & Novack, 2021): questo è un caso in cui l'incertezza quantitativa si è ridotta col progresso della conoscenza. È interessante anche il commento a piè di pagina nel testo IPCC che chiarisce cosa si intenda per “*multiple lines of evidence*” – include la migliore comprensione dei processi, i record paleoclimatici, e i vincoli emergenti da confronti tra modello e osservazioni – evidenziando la natura multimodale dell'evidenza considerata.

Un altro punto cruciale in AR6 è l'attenzione ai cosiddetti “*low-likelihood, high-impact outcomes*”. Nell'SPM del WGI troviamo l'affermazione:

“Low-likelihood outcomes, such as ice-sheet collapse, abrupt ocean circulation changes, some compound extreme events, and warming substantially larger than the assessed very likely range of future warming, cannot be ruled out and are part of risk assessment.”
 (IPCC, 2021, p.27)

Questo punto riconosce esplicitamente che esistono scenari a bassa probabilità ma ad elevatissimo impatto – ad esempio il collasso rapido della calotta antartica occidentale con conseguenti metri di innalzamento marino, oppure un cambiamento repentino della circolazione termoalina atlantica – la cui possibilità non può essere esclusa, pur non essendo considerati “*likely*” secondo le definizioni standard. L'IPCC quindi li include nella valutazione del rischio, comunicando ai decisori che, sebbene tali eventi abbiano probabilità piccole (non quantificabili con confidenza), il loro potenziale distruttivo li rende rilevanti. Nel rapporto completo, queste possibilità vengono qualificate come affette da *deep uncertainty*, ovvero incertezze profonde che sfuggono a una valutazione probabilistica precisa ma che devono essere considerate data la loro importanza. Ad esempio, per l'innalzamento del livello del mare al 2100, l'IPCC presenta sia uno scenario probabile sia una coda di

distribuzione che mostra possibilità di aumento ben maggiori includendo processi poco compresi di instabilità delle calotte (Fig. 3.1), avvertendo però che c'è low confidence in quei modelli estremi.

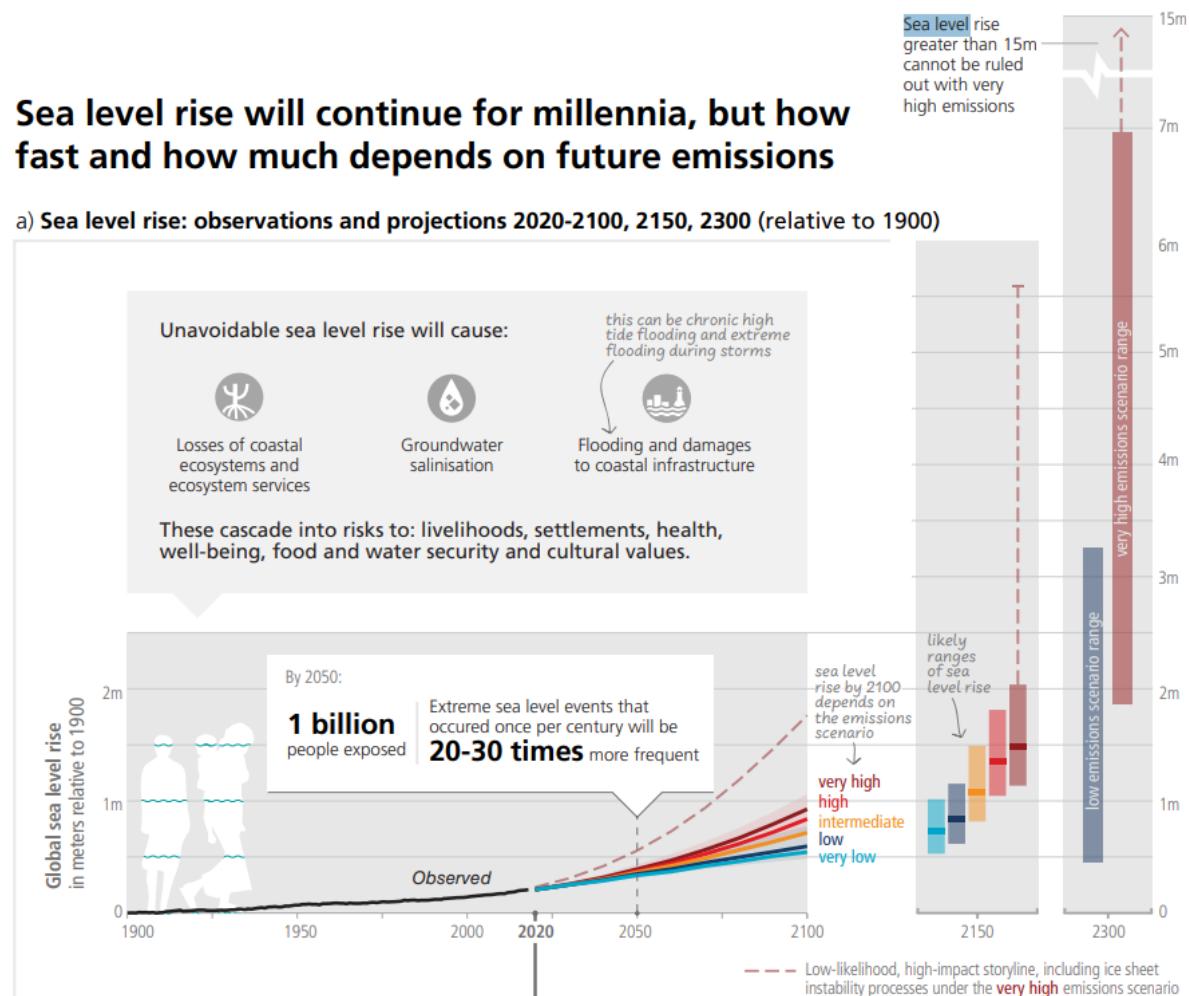


Fig. 3.1: Variazione globale del livello medio del mare in metri rispetto al 1900. Le variazioni storiche (in nero) sono osservate dai mareografi prima del 1992 e dagli altimetri dopo. Le variazioni future fino al 2100 e per il 2150 (linee colorate e ombreggiature) sono valutate in modo coerente con i vincoli osservativi basati sull'emulazione di CMIP, modelli di calotta glaciale e ghiacciai, e i valori mediani e gli intervalli probabili sono mostrati per gli scenari considerati. Linee tratteggiate rosse: scenario a bassa probabilità e alto impatto, inclusi i processi di instabilità della calotta glaciale. Queste indicano il potenziale impatto di processi profondamente incerti che includono processi a bassa probabilità e alto impatto che non possono essere esclusi. Fonte: IPCC, AR6 Synthesis Report, pp.80-81.

Questa scelta di comunicare anche le code degli esiti peggiori, con tutte le cautele del caso, mostra l'evoluzione dell'approccio IPCC: non solo comunicare ciò che è più probabile, ma anche ciò che, pur improbabile, avrebbe conseguenze tanto gravi da meritare attenzione in ottica prudenziale. Tale evoluzione è in linea con le richieste di molti esperti di risk analysis di andare oltre le sole prospettive probabilistiche e adottare una visione più ampia del rischio.

Riassumendo, il framework IPCC nell'AR6 rappresenta lo stato dell'arte di un tentativo ventennale di standardizzare la comunicazione dell'incertezza nel campo del cambiamento climatico. Esso fornisce un linguaggio condiviso (confidence e likelihood) e insiste su trasparenza e rigore nel qualificare ogni affermazione chiave con il suo contorno di incertezza. Nonostante ciò, come vedremo, questo stesso framework è oggetto di analisi critiche da parte di filosofi, epistemologi e anche da alcuni membri della comunità scientifica, che ne hanno messo in luce alcune debolezze concettuali e potenziali effetti indesiderati nella comprensione da parte dei destinatari. Nella sezione seguente esploreremo tali criticità filosofiche ed epistemologiche, riferendoci in particolare ai lavori di Wüthrich (2017) e di Aven e Renn (2015), che hanno esaminato in profondità il trattamento dell'incertezza da parte dell'IPCC.

3.1.2 Criticità filosofiche ed epistemologiche del framework IPCC

Nonostante le buone intenzioni e l'indubbio rigore con cui l'IPCC ha costruito il proprio framework sull'incertezza, diversi studiosi hanno sollevato dubbi sulla sua consistenza concettuale e sulla solidità teorica delle sue basi. Uno degli esami più approfonditi in tal senso è quello di Nicolas Wüthrich, che nel suo saggio riconosce innanzitutto il merito dell'IPCC nell'aver tentato un'operazione ambiziosa: una concettualizzazione unificata di diversi tipi di incertezza (dalle incertezze di modello e dati, a quelle di scenario e perfino incertezze etiche legate ai giudizi di valore nelle politiche climatiche) all'interno di un singolo schema. Tale schema, nelle intenzioni, doveva servire sia come strumento analitico per gli scienziati (aiutarli a capire e strutturare le incertezze) sia come strumento comunicativo per i decisori. Tuttavia, analizzando in dettaglio la versione del framework usata in AR5, Wüthrich identifica tre problemi concettuali sostanziali che ne minano la coerenza:

- Il primo problema riguarda la natura stessa della *confidence* e il modo in cui combina evidenza e accordo tra esperti. Nel framework IPCC, come visto, la confidenza è concettualizzata come funzione di due dimensioni distinte: robustezza delle evidenze da un lato e grado di consenso dall'altro. Wüthrich argomenta che questa separazione è in realtà fuorviante: l'accordo tra esperti non dovrebbe essere considerato indipendente dall'evidenza disponibile. Se un insieme di prove è robusto – cioè multiplo, consistente e di alta qualità – allora presumibilmente gli esperti competenti finiranno per convergere (accordo elevato) sul risultato, a meno che non abbiano preconcetti fortemente divergenti; viceversa, un disaccordo persistente tra scienziati indica in genere che l'evidenza non è univoca o sufficiente. In altri termini, “*agreement should not be viewed as an independent dimension from evidence*” (Wutrich, 2017, p.). Secondo Wüthrich, far dipendere la confidenza da due assi separati può portare a situazioni concettualmente ambigue: ad esempio l'IPCC consente l'uso di formulazioni come “evidenza robusta ma

accordo limitato” (o viceversa). Ma cosa significa davvero “evidenza robusta con basso accordo”? Se le evidenze sono robuste e coerenti, perché mai gli esperti dovrebbero essere in disaccordo? Wüthrich osserva che per salvare questa possibilità qualcuno potrebbe invocare differenti distribuzioni di probabilità a priori bayesiane degli esperti, ma ciò stride con la stessa definizione di evidenza robusta dell'IPCC (dati di alta qualità e coerenti) che in pratica dovrebbe portare chiunque alla stessa conclusione. L'impressione è che la dicotomia evidenza/accordo introduca ridondanza e potenziale inconsistenza. Wüthrich propone quindi come prima tappa di una riforma del framework quella di eliminare la biforcazione: la confidenza dovrebbe dipendere unicamente dalla forza dell'evidenza, mentre il ruolo del giudizio esperto (e dell'accordo/disaccordo) andrebbe incorporato nella valutazione di tale forza. In pratica, egli auspica criteri più chiari e magari formalizzati per valutare la qualità e quantità di evidenza e, successivamente, una volta valutata l'evidenza aggregata, derivarne la confidenza in modo trasparente. Ciò renderebbe la confidenza meno arbitraria e soggetta a interpretazioni variabili.

Il framework dell'AR6 mantiene la struttura di confidence basata su *evidence* e *agreement*, come già in AR5; infatti, non si trovano spiegazioni o cambiamenti concettuali che eliminino la biforcazione e le due dimensioni restano formalmente distinte.

- Il secondo problema concettuale evidenziato riguarda la relazione tra *confidence* e *likelihood*. Nella guida IPCC c'è una certa ambiguità sul loro utilizzo congiunto: da un lato si afferma che sono dimensioni diverse, dall'altro si suggerisce di non fornire probabilità numeriche se la confidenza nel risultato è bassa. In pratica, come già accennato, l'IPCC scoraggia l'uso di termini di probabilità per risultati incerti, a meno che la confidenza nell'evidenza sottostante sia alta. Wüthrich critica questa regola come epistemicamente discutibile: se anche ho bassa confidenza in una stima, ma possiedo comunque informazioni probabilistiche (per quanto con margine di errore ampio), perché proibire di comunicarle? Escludere totalmente l'informazione probabilistica in caso di confidenza medio-bassa equivale a omettere delle informazioni disponibili, il che viola il cosiddetto principio di *total evidence* formulato dal filosofo Rudolf Carnap (1950). Secondo tale principio, tutte le evidenze pertinenti andrebbero utilizzate nel formare un giudizio probabilistico. Ad esempio, immaginiamo che un certo modello climatico indichi un 20% di probabilità di collasso della calotta antartica entro il 2100, ma con confidenza bassa perché i modelli divergono molto; seguendo alla lettera la guida IPCC AR5, gli autori potrebbero decidere di non menzionare affatto quel numero (20%) se la confidenza è bassa. Ma così facendo, il *policy maker* potrebbe non essere informato dell'esistenza di una possibilità non trascurabile che un certo evento catastrofico avvenga, benché incerta. Wüthrich suggerisce che questa scelta di comunicazione merita un

approfondimento in quanto per eccesso di prudenza metodologica si rischia di sottrarre elementi utili alla comprensione del rischio complessivo. Idealmente, anche in presenza di confidenza limitata, si potrebbe comunicare la migliore stima probabilistica disponibile, esplicitando però l'alto grado di incertezza che l'accompagna.

Sempre riguardo alla relazione tra *confidence* e *likelihood*, se da una parte è vero che la *Guidance Note* e la metodologia IPCC raccomandano che le probabilità quantitative vengano usate solo quando c'è confidence alta o molto alta - questo è stato il principio formale anche in AR5 e viene ribadito come buona prassi in AR6 - nella pratica, tuttavia, anche il ciclo di rapporti AR6 utilizza i termini di probabilità sia in presenza di confidence media che, talvolta, senza indicare affatto la *confidence*.

Alcuni esempi concreti sono:

“Human influence has likely increased the chance of compound extreme events since the 1950s, including increases in the frequency of concurrent heatwaves and droughts (high confidence).”
 (IPCC, 2023, p.5)

“Combinations of non-structural measures like early warning systems and structural measures like levees have reduced loss of lives in case of inland flooding (medium confidence).”
 (IPCC, 2023, p. 8)

“The likely range of total human-caused global surface temperature increase from 1850–1900 to 2010–20197 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C.”
 (IPCC, 2021, p. 4)

Nell'ultimo esempio non è specificata la confidence nella stessa frase.

Per conciliare questa prassi con la regola teorica, si potrebbe interpretare la norma come riferita solo alle probabilità numeriche complete (es. funzioni di densità di probabilità), e non ai semplici intervalli qualitativi.

- Il terzo problema individuato da Wüthrich è più generale e riguarda la mancanza di un modello teorico chiaro per l'aggregazione delle evidenze. L'IPCC affronta problemi estremamente complessi dove convergono molteplici linee di evidenza: osservazioni, modelli, simulazioni di impatti, ecc. Come combinare tutto ciò in un singolo giudizio di confidenza o probabilità? Il framework usato in AR5 lascia molto alla discrezione degli autori, offrendo linee guida qualitative ma nessun metodo univoco. Questo conduce a possibili incoerenze tra capitoli o gruppi di lavoro diversi e rende difficile valutare ex post la replicabilità delle valutazioni di incertezza. Le regole di aggregazione tra *evidence* e *agreement* poco chiare, non trasparenti o concettualmente problematiche permangono anche in AR6, dove il processo di aggregazione è lasciato alle linee guida per gli autori, che

rimandano alla *Guidance Note*, e non viene introdotto nessun algoritmo o procedura trasparente e rigorosa per l'aggregazione; le valutazioni rimangono frutto di un consenso editoriale tra autori.

Wüthrich sostiene che servirebbe sviluppare una sorta di modello di aggregazione per la valutazione delle incertezze IPCC. Egli propone una roadmap in tre passi:

1. rimuovere la dicotomia evidenza/accordo,
2. identificare criteri esplicativi per valutare la qualità dell'insieme di evidenze disponibili (ad esempio quantità dei dati, concordanza con la teoria, coerenza interna, etc.),
3. sviluppare regole per aggregare tali criteri in un giudizio di confidenza quantitativo.

A tal fine si potrebbe attingere a metodologie da altri campi: la *social choice theory* (Arrow, K. J., 1963) o la *multi-criteria decision analysis* (Belton, V., & Stewart, T. J., 2002) offrono strumenti per combinare valutazioni multiple in modo formalizzato. Pur ammettendo che un completo formalismo generale potrebbe non essere raggiungibile (data la varietà dei casi climatici), questa può essere una direzione di miglioramento per dare basi più sostanziose al framework, evitando assunzioni implicite o eccessiva discrezionalità.

Accanto all'analisi di Wüthrich, un'altra prospettiva rilevante è offerta da Aven e Renn (2015), esperti rispettivamente di analisi del rischio e sociologia del rischio. Il concetto di rischio è strettamente connesso a quello di incertezza, soprattutto nella gestione e nella comunicazione del cambiamento climatico. Questi concetti, pur distinti, si influenzano reciprocamente nella definizione delle strategie di adattamento e mitigazione: se da una parte l'incertezza rappresenta il contesto epistemico e decisionale entro cui si collocano le valutazioni climatiche, dall'altra il rischio incarna le conseguenze potenziali derivanti da queste condizioni incerte, traducendole in termini operativi utili per la decisione politica e la gestione dei sistemi socio-ambientali. In particolare, il concetto di probabilità fornisce la base per l'identificazione e la valutazione del rischio climatico perché permette di attribuire un valore numerico alle probabilità di scenari climatici specifici, rendendo possibile stimare e quantificare il rischio associato a determinati eventi climatici. Infatti, il concetto tecnico di rischio si concentra in modo ristretto sulla probabilità degli eventi e sull'entità delle conseguenze e viene definito come il prodotto di questi due fattori. Ad esempio, se l'evento considerato è un'ondata di calore estrema che potrebbe causare danni significativi alla salute pubblica e all'economia locale, la stima del rischio è ottenuta considerando la probabilità di quell'evento moltiplicata per le conseguenze stimate.

La quantificazione delle probabilità consente di confrontare scenari differenti e determinare quali meritano maggiore attenzione (ad esempio, eventi con alta probabilità e impatti gravi richiederanno interventi prioritari rispetto a eventi con probabilità inferiore e/o impatti minori), però ciò significa che la società dovrebbe

essere indifferente a un rischio con basse conseguenze e alta probabilità, rispetto a uno con alte conseguenze ma bassa probabilità, se i valori attesi sono uguali.

Inoltre, il collegamento tra probabilità e rischio presenta alcune criticità che derivano dalla difficoltà intrinseca nella valutazione delle incertezze climatiche: le metriche usate dall'IPCC sono infatti soggette a interpretazioni variabili e talvolta imprecise, causando difficoltà nella comunicazione chiara e coerente del rischio.

In questo contesto, Aven e Renn criticano la definizione troppo ristretta di rischio perché, soprattutto quando si stanno considerando i grandi rischi globali, tale impostazione è limitativa: se si comunica un rischio solo tramite una probabilità attesa e un danno atteso, si tende a trascurare aspetti cruciali come la distribuzione dell'incertezza (es. scenari pessimistici vs ottimistici), l'avversione al rischio nella società e le dimensioni qualitative del pericolo. Inoltre, per rischi caratterizzati da incertezza profonda (dove non è neppure possibile stimare bene la probabilità), la formula classica semplicemente non si applica. Aven e Renn sostengono che l'IPCC, pur migliorando di rapporto in rapporto, soffre ancora di mancanza di precisione concettuale su questi termini, e continua a prescrivere prospettive probabilistiche che potrebbero distorcere la comunicazione dei risultati scientifici.

Aven e Renn propongono di andare oltre le prospettive basate sulla probabilità nel valutare i rischi climatici, sfruttando i nuovi approcci al rischio che negli ultimi anni sono stati sviluppati e che mettono al centro l'incertezza più che la probabilità precisa. Un elemento chiave di questi approcci è una più netta distinzione concettuale tra rischio e incertezza. Nel linguaggio corrente e in parte in quello IPCC, il termine "rischio" spesso incorpora già l'idea di incertezza (un rischio implica un potenziale di perdita non certo). Ma i teorici del rischio, come Aven, suggeriscono di definire rigorosamente il rischio come la possibilità di conseguenze (negative) future, mentre l'incertezza come la mancanza di conoscenza sulla realizzazione di quelle conseguenze. In questa visione, la probabilità è solo una delle possibili metriche per descrivere l'incertezza, e non sempre la più appropriata, specie quando non c'è una serie storica o un modello stabile da cui derivare frequenze. Ad esempio, per i cambiamenti climatici potremmo avere alta incertezza su una certa soglia critica e in questi casi si dovrebbe parlare di rischio in termini di scenario worst-case, non di probabilità puntuale.

Aven e Renn enfatizzano che molta terminologia IPCC confonde queste sfumature e dunque suggeriscono di adottare prospettive più ampie, come l'analisi di scenario, valutazioni qualitative di grado di incertezza (ad esempio categorie di incertezza profonda, riconducibili ai concetti di *known unknowns* e *unknown unknowns*²) e misure di robustezza delle conclusioni di policy a fronte delle incertezze. In

² Gli *unknown unknowns* sono aspetti della realtà che non solo non conosciamo, ma nemmeno sappiamo di non conoscere.

particolare, il modello proposto da Aven e Renn prevede una struttura del rischio basata sulla triplice componente C', Q, K, dove C' prende in considerazione le conseguenze, Q la misura di incertezza, e K la forza della conoscenza, ossia la valutazione esplicita della robustezza della base di conoscenze (Fig. 8).

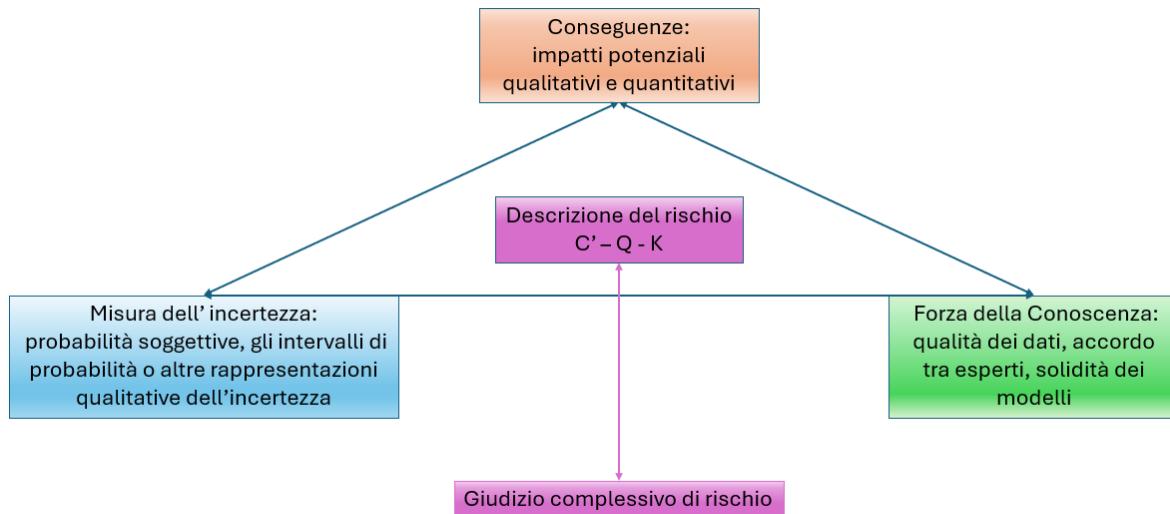


Fig. 8: Grafico riassuntivo prodotto a partire dal modello di Aven e Renn.

Da un punto di vista epistemologico, Aven e Renn accusano anche una certa carenza di fondamenti scientifici chiari nel modo in cui l'IPCC definisce termini come *"likelihood"*, *"probability"*, *"confidence"*, con il rischio di inconsistenze e di interpretazioni disomogenee tra autori provenienti da discipline diverse. È interessante notare che le critiche di Wüthrich e quelle di Aven e Renn, pur provenendo da prospettive diverse, convergono su un punto di fondo: l'IPCC dovrebbe rendere più esplicito e robusto il modello con cui aggrega evidenze e incertezze, per evitare assunzioni implicite che possano portare a fraintendimenti.

Aven e Renn muovono critiche in parte sovrapponibili a quelle di Wüthrich, ma con un'enfasi diversa: secondo loro, l'IPCC non fornisce basi teoriche sufficientemente convincenti per il trattamento di rischio e incertezza, e ciò ha conseguenze non banali sulla comunicazione ai decisori: un framework concettualmente debole può portare a una comunicazione distorta dei risultati scientifici e fuorviare il pubblico e i decisori. Questo introduce il tema delle effettive interpretazioni che i destinatari danno del linguaggio IPCC.

3.2 Dalla scienza ai decisori: interpretazione e comunicazione dell'incertezza

Come il linguaggio calibrato dell'IPCC venga recepito dai destinatari finali – primi fra tutti i decisori politici, ma anche media, *stakeholder* e pubblico informato - è un aspetto cruciale. L'IPCC spera che termini come “*very likely* (90%)” o “*medium confidence*” siano compresi in modo uniforme e corretto, ma la ricerca empirica in ambito di *science communication* (Budescu et al., 2009, 2012, 2014; Patt & Schrag, 2003; Van der Bles et al. 2019) e di psicologia del giudizio e delle decisioni (Harris & Corner, 2011; Teigen & Brun, 1999), suggerisce che l'interpretazione di queste espressioni varia considerevolmente sia tra persone comuni che tra esperti di discipline diverse.

Infatti, Budescu e colleghi (2014) hanno ampliato gli studi precedenti (2009, 2012) prendendo 25 campioni in 24 paesi, con 17 diverse lingue. Siccome nei precedenti studi (2009, 2012) hanno esaminato come il pubblico americano interpretasse i termini verbali di probabilità dell'IPCC, hanno voluto ampliare i risultati al pubblico internazionale: essi mostrarono frasi tratte dai report IPCC a campioni di lettori in diversi paesi, chiedendo loro di quantificare termini come “*likely*”. Sono emerse discrepanze significative: molti lettori intendevano “*likely*” semplicemente come “più probabile che no” (quindi appena sopra il 50%), mentre pochi lo associano spontaneamente al $\geq 66\%$ indicato dall'IPCC. Analogamente, termini come “*very likely*” venivano interpretati chi da 70%, chi da 90%, chi quasi come certezza. In generale, la gente tende a sottostimare il valore delle espressioni positive (“*likely*”) e a sovrastimare quello delle espressioni negative (“*unlikely*”). Questo significa che un decisore che legge “*likely 66%*” potrebbe pensare che l'IPCC intenda magari 50-60%, ridimensionando inconsciamente l'affidabilità del risultato; mentre se legge “*unlikely*” (che per IPCC è $\leq 33\%$), potrebbe intenderlo più vicino a 10% o proprio “quasi impossibile”, sottovalutando magari un 30% effettivo. Inoltre, la ricerca di Budescu e colleghi ha provato che, quando le frasi sono presentate nel contesto del cambiamento climatico, le interpretazioni oscillano di più (probabilmente a causa di bias preesistenti dei lettori sul tema) rispetto a quando le interpretazioni dei termini sono fatte fuori da quel contesto. Un risultato interessante della ricerca sta nella scoperta secondo cui affiancare ai termini verbali la percentuale numerica migliora leggermente la comprensione, ma non risolve ogni ambiguità. Per questo, Budescu e colleghi (2009, 2012, 2014) hanno suggerito che l'IPCC dovrebbe sempre includere sia il termine verbale che la traduzione numerica, ad esempio scrivendo “*very likely (90–100% probability)*”. In effetti, in certi punti dell'AR6 questa pratica è stata adottata, specialmente per chiarire concetti cruciali come “*virtually certain*” (99-100%) su cui non si voleva alcun dubbio interpretativo. Tuttavia, la doppia notazione può appesantire il testo e per il pubblico generale la percezione di percentuali potrebbe generare a sua volta confusione (“90-100%” è un intervallo ampio, significa 95%? Perché non dire direttamente 95%? ecc.). È un delicato equilibrio tra precisione e chiarezza.

Altri studi (come, ad esempio, Harris et al., 2017; Kause et al., 2022) hanno evidenziato che, quando ai lettori vengono presentati simultaneamente termini di *likelihood* e livelli di *confidence*, la percezione del messaggio può cambiare; leggere “*likely, low confidence*” induce alcuni a interpretare “*likely*” come meno probabile di quanto farebbero se comparisse da solo – forse perché “*low confidence*” instilla il dubbio che quel “*likely*” sia poco affidabile. Viceversa, “*unlikely, high confidence*” può essere recepito come “è davvero improbabile” più di quanto la parola *unlikely* da sola suggerirebbe. Questo indica che l’aggiunta del meta-messaggio di *confidence* modifica la psicologia con cui il destinatario processa la probabilità. Non è facile prevedere esattamente come, perché mentre alcune ricerche mostrano che presentare la *confidence* aiuta a non esagerare la certezza di previsioni incerte (in pratica funziona da allarme per il lettore), altre suggeriscono che potrebbe confondere perché il lettore non sa integrare due dimensioni diverse (accordo e probabilità) e potrebbe focalizzarsi su una sola.

La natura dell’IPCC porta però ad un rapporto difficile da bilanciare tra due tipologie differenti di pubblico: tecnico da un lato (i consulenti scientifici dei governi, gli esperti dei ministeri, ecc., che comprendono bene il linguaggio probabilistico) e generale dall’altro (media, opinione pubblica e politici, privi di un background tecnico). Un linguaggio troppo semplicistico rischierebbe di non rendere giustizia alla scienza; uno troppo tecnico rischia di non essere compreso o, peggio, di essere distorto involontariamente nella comunicazione secondaria (ad es. comunicati stampa). La semplificazione eccessiva può portare a titoli giornalistici fuorvianti, mentre l’iper-precisione può portare all’effetto opposto, ovvero paralisi decisionale o disorientamento. Un caso emblematico di rischio comunicativo legato all’incertezza è stato quello della cosiddetta “pausa del riscaldamento” (*warming hiatus*) dopo il 1998: nel Synthesis Report del 2014 l’IPCC discusse il rallentamento della crescita delle temperature superficiali nei primi anni 2000 con confidence medio-bassa, esplorando possibili cause naturali temporanee. Questa sottigliezza fu però sfruttata dai media scettici per affermare che l’IPCC stava ammettendo che il riscaldamento globale si era fermato, il che non era affatto la conclusione del rapporto. Qui si vede come comunicare un elemento di incertezza (nel caso, la variabilità decadale naturale) abbia offerto un appiglio per distorcere il messaggio complessivo. L’IPCC ha imparato da episodi così, infatti nell’AR6, la narrazione è stata più attenta a contestualizzare ogni incertezza. Ad esempio, a proposito delle variazioni a breve termine, l’AR6 afferma con alta confidenza che la variabilità naturale modula la tendenza, ma ha scarso effetto sul riscaldamento secolare, smorzando sul nascere possibili equivoci (IPCC, 2023).

Un altro ambito di semplificazione rischiosa riguarda la comunicazione visiva dell’incertezza: l’IPCC usa spesso grafici con bande d’incertezza, ombre, boxplot, ecc, ma diversi studi (Kinkeldey et al, 2014; Retchless, 2016; Løhre et al., 2019; Mason & Newell, 2025) hanno mostrato che molti non esperti interpretano male questi elementi grafici. Per esempio, le fasce colorate attorno alle linee nei grafici di

proiezione (che rappresentano l'intervallo molto probabile, 5-95%) vengono talora intese come “range completo di possibilità” o addirittura come parte del grafico di scenario e non come incertezza. L'uso di terminologia appropriata nelle figure (es. ombreggiatura per il *likely range*) e note esplicative sta diventando sempre più puntuale; tuttavia, quando i media riprendono solo la linea centrale (scenario medio), rischiano di semplificare eccessivamente, non comunicando l'incertezza. Al contrario, enfatizzando solo l'incertezza (“le proiezioni variano moltissimo, non si sa che accadrà!”), si alimenta l'idea errata che tutto sia possibile e che quindi non valga la pena agire.

In sintesi, la comunicazione dell'incertezza ai *policy makers* e al pubblico è un esercizio di equilibrio: fornire informazioni sufficienti sull'affidabilità senza generare confusione o false percezioni. Da un lato, bisogna evitare di lanciare allarmi troppo drammatici non adeguatamente supportati, che potrebbero screditare la scienza se non si verificano (ad esempio, annunciare come certo un evento estremo poi non verificatosi, un falso allarme). Dall'altro lato, è necessario evitare di edulcorare eccessivamente i messaggi, mettendo l'accento sulle incertezze al punto da indurre inerzia (dato che c'è incertezza, si aspetta per vedere cosa succede).

Il framework IPCC cerca di prevenire il primo rischio (allarmismo ingiustificato) enfatizzando l'importanza di un'alta confidenza prima di fare affermazioni forti. Come sottolineato da Theodore Shepherd (2019) e da Lloyd & Oreskes (2019), ciò porta con sé il pericolo opposto: privilegiando la cautela per evitare errori di tipo 1 (falsi allarmi), si alza la probabilità di errori di tipo 2, ovvero di mancate allerte su eventi che poi si verificano. Shepherd osserva che il framework di *confidence*, focalizzato sull'evitare falsi positivi, solleva la prospettiva di commettere falsi negativi (allarmi mancati); ciò ha implicazioni etiche, in quanto non avvertire adeguatamente di un possibile rischio, seppur incerto, può negare a società e decisori la possibilità di prepararsi o prevenirlo. Lloyd e Oreskes, in uno studio del 2019, fanno eco a questa preoccupazione affermando che è necessaria una maggiore discussione sui rischi sociali di una sottostima degli effetti antropici e dei pericoli di una sottorappresentazione del cambiamento climatico.

In altre parole, tanto pericolo risiede nell'eccesso di prudenza quanto nell'eccesso di allarme. La comunicazione dovrebbe idealmente riuscire a trasmettere sia l'urgenza sia l'*honest uncertainty* dietro ai numeri. Non è semplice: si potrebbero proporre soluzioni come l'utilizzo di range narrativi in cui si indica che, ad esempio, la temperatura potrebbe aumentare tra X e Y gradi (X se riuscissimo a mitigare fortemente, Y se le retroazioni più sfavorevoli si attivassero) invece di utilizzare singoli valori, oppure esplicitare cosa significherebbe un *worst case* e cosa significherebbe un *best case*. Ad esempio, l'AR6 Synthesis Report include una tabella che illustra, per ogni scenario emissivo, sia la stima migliore del riscaldamento che il range molto probabile, e nota poi che scenari ancora più caldi

(oltre il range) non sono esclusi se la sensibilità climatica fosse alta. Questo fornisce al lettore strumenti per valutare i rischi, guardando oltre la media.

Va anche sottolineato un ultimo punto, ossia la cultura del decisore in relazione all'incertezza. Non tutti i decisori reagiscono allo stesso modo e, mentre alcuni governi o amministratori adottano approcci precauzionali, dando peso agli scenari peggiori, altri tendono a focalizzarsi sul mainstream e potrebbero ignorare le code di incertezza. La comunicazione ideale dovrebbe essere in grado di dialogare con entrambe queste mentalità: offrire evidenze per azioni cautelative (ad esempio, mostrando che certi disastri, pur improbabili, avrebbero costi enormi; quindi, conviene prevenirli) e, al contempo, rassicurare che la scienza non sta andando nel panico, ma presenta naturalmente gradi di incertezza.

Nella pratica, l'IPCC cerca di fornire i fatti con le loro incertezze, ma non dice esplicitamente quale sia il livello di rischio accettabile, lasciandolo al dibattito politico. Se però l'incertezza non è capita, quel dibattito rischia di partire su basi sbagliate. Una traduzione efficace spesso richiede interazione umana oltre al testo scritto; quindi, la formazione e il dialogo diventano fondamentali. Per questo motivo, molti esperti dell'IPCC partecipano a workshop con i decisori per spiegare i rapporti, rispondere a domande sui dettagli probabilistici e chiarire le misconcezioni.

In prospettiva critica, Hulme e De Pryck (2023) osservano che, nel contesto dell'IPCC, l'incertezza diventa un "oggetto negoziato": deve essere formulata in un linguaggio condiviso tra scienziati di discipline diverse, governi con interessi contrastanti e policy maker alla ricerca di indicazioni operative. Da un lato, questa codifica rende possibile la comparabilità e la coerenza dei rapporti; dall'altro, rischia di appiattire la ricchezza del dibattito scientifico in categorie standardizzate che, se mal comprese, possono alimentare equivoci o strumentalizzazioni nel discorso pubblico.

In conclusione, comunicare l'incertezza ai *policy makers* e al pubblico è tanto importante quanto generare i dati scientifici stessi. Errori in questa fase possono compromettere l'uso delle migliori conoscenze disponibili. Nei decenni di esistenza dell'IPCC si è fatta molta strada, ma come hanno mostrato gli studi citati, non basta normare un linguaggio: bisogna comprenderne l'effetto su chi ascolta. Questo ha portato alcuni scienziati e filosofi a proporre approcci comunicativi alternativi, più vicini al modo in cui le persone pensano al rischio e all'incertezza. Tra questi spicca l'idea delle *climate storylines* (Shepherd, 2019), che vedremo meglio nel prossimo capitolo. Si tratta di narrazioni climatiche fisicamente coerenti, costruite a partire dai modelli e dai dati ma orientate a esplorare scenari condizionali del tipo "che cosa succede se...?", più che a fornire stime probabilistiche globali. In questo senso, le storyline rappresentano a loro volta un approccio alla gestione dell'incertezza, complementare ai framework quantitativi, perché permettono di collegare in modo

più diretto la conoscenza modellistica alle domande dei decisori e, come vedremo nel capitolo 4, anche alle pratiche educative.

La discrepanza tra la rigorosa calibrazione dell'incertezza effettuata dall'IPCC e la vulnerabilità di tali messaggi nel contesto mediatico emerge con particolare forza dall'International Panel on the Information Environment (IPIE): la complessità nella comunicazione climatica non riguarda solo quali incertezze trasmettere, ma anche la qualità dell'ambiente informativo in cui tali messaggi vengono diffusi. Infatti, la corretta interpretazione dei messaggi scientifici dipende fortemente dall'integrità dell'ecosistema mediatico in cui avviene la loro ricezione.

L'International Panel on the Information Environment (IPIE) è un organismo scientifico indipendente e globale, istituito nel 2022, che si propone di fare per l'ecosistema informativo ciò che l'IPCC fa per il clima: organizzare, valutare e sintetizzare in modo neutrale la ricerca disponibile, producendo valutazioni utilizzabili da decisori politici, industria e società civile. I suoi panel riuniscono centinaia di esperti di scienze sociali, informatica, media studies e policy per analizzare minacce come disinformazione, manipolazione algoritmica, bias dell'IA e campagne coordinate di influenza. Negli ultimi anni una parte centrale dell'attività dell'IPIE si è concentrata proprio sull'integrità dell'informazione relativa al cambiamento climatico, attraverso un panel specifico dedicato alla *“information integrity about climate science”* che ha portato alla redazione del rapporto del 2025 su cui si basa la discussione che segue.

L'IPIE, attraverso una rigorosa revisione sistemica di circa 300 studi condotti nel periodo 2015-2025 riportata nell'articolo del 2025, identifica quattro dimensioni cruciali per valutare l'integrità informativa sul cambiamento climatico: accuratezza, coerenza, affidabilità e trasparenza. Il rapporto evidenzia chiaramente come attori economici e politici potenti, in particolare le industrie legate ai combustibili fossili e i partiti politici populisti, abbiano sistematicamente diffuso narrazioni fuorvianti riguardo al consenso scientifico. Queste campagne hanno generato cicli negativi di sfiducia pubblica, riducendo l'efficacia delle politiche climatiche e amplificando l'incertezza percepita dai decisori politici e dai cittadini.

Tra i risultati principali del rapporto si trovano quattro raccomandazioni chiave:

- Interventi normativi più stringenti per limitare la diffusione intenzionale di informazioni fuorvianti;
- Applicazione effettiva delle norme già esistenti contro la disinformazione;
- Costruzione di coalizioni intersettoriali tra scienziati, società civile e policy maker per promuovere la comunicazione accurata;
- Potenziamento dei programmi di educazione ai media e alfabetizzazione climatica.

La diffusione coordinata di informazioni fuorvianti genera quella che può essere definita un'incertezza sociale o "decisionale", che si sovrappone e complica l'incertezza epistemica già presente nella scienza del clima, creando un ciclo negativo che conduce all'inerzia politica. Questa sovrapposizione contribuisce a una significativa paralisi decisionale, caratterizzata da ritardi legislativi e da una generale difficoltà nell'assumere impegni politici ambiziosi, pur in presenza di evidenze scientifiche robuste e consolidate. Un ulteriore aspetto critico evidenziato dall'IPIE è il gap Nord/Sud: proprio nelle regioni più vulnerabili ai cambiamenti climatici, come quelle del Sud del mondo, esistono meno studi sul rumore informativo e minori capacità di contrastare la disinformazione, aggravando così le disuguaglianze climatiche e sociali.

Questa situazione rende evidente un'importante asimmetria: mentre il framework dell'IPCC calibra con estrema attenzione l'incertezza scientifica tramite indicatori di confidence e likelihood, spesso i media semplificano eccessivamente le comunicazioni scientifiche, privando il pubblico delle indicazioni meta-informative fondamentali per interpretare correttamente l'incertezza. Quindi, queste informazioni perdono spesso la loro valenza comunicativa quando sono semplificate eccessivamente o distorte dai media. A tal proposito, l'IPIE propone indicatori specifici di integrità informativa (accuratezza, coerenza, affidabilità e trasparenza), capaci di monitorare e garantire la qualità del contesto in cui avviene la comunicazione, affiancandosi a quelli adottati dall'IPCC per garantire che i messaggi scientifici raggiungano il pubblico e i decisori nel modo più corretto ed efficace.

3.3 Rischio e incertezza: quadri teorici oltre l'approccio IPCC

Nel tentativo di migliorare la comprensione e l'uso delle informazioni climatiche incerte è importante condividere delle letture innovative che si posizionano al fianco, e in parte sfidano, l'approccio proposto dall'IPCC. Uno di questi è l'inclusione di considerazioni sociali e valoriali accanto ai dati scientifici, pilastro della scienza post-normale. Funtowicz e Ravetz (1993) sostenevano che, in problemi come il clima, la qualità della scienza non può essere garantita solo da parametri interni, ma richiede un ampio concetto di *peer community*, includendo *stakeholder*, comunità locali e altri portatori di interesse per valutare se i risultati abbiano senso e siano utili. Un esempio pratico sono i processi partecipativi di valutazione del rischio climatico: panel in cui scienziati presentano i range di incertezza e poi cittadini o amministratori discutono quali margini ritengono accettabili o preoccupanti. Questo coinvolgimento deliberativo può portare a esiti comunicativi diversi; ad esempio, alcune città hanno adottato obiettivi climatici più stringenti rispetto a quelli nazionali perché, in assemblee civiche, i partecipanti hanno valutato che l'incertezza sugli impatti era tale da suggerire prudenza extra. Dal punto di vista comunicativo, ciò significa spostare l'accento dal "trasmettere informazioni" al "co-costruire comprensione" dell'incertezza.

La scienza post-normale invita a rendere esplicati i valori e gli assunti sottostanti le valutazioni scientifiche. Nel caso dell'IPCC, un'analisi post-normale potrebbe chiedere: perché adottare il 90% come soglia di "very likely" e non 80%? Quali implicazioni valoriali ha questa scelta in termini di precauzione? Chi decide qual è il rischio accettabile? Queste domande spingono la comunicazione oltre la semplice presentazione neutra dei dati, entrando nell'arena del dialogo tra scienza e società.

In parallelo, la società del rischio teorizzata da Ulrich Beck (1992) offre un quadro sociologico per comprendere il contesto in cui avviene la comunicazione dell'incertezza climatica. Beck descrive la modernità avanzata come un'epoca in cui siamo circondati da rischi globali prodotti dallo sviluppo stesso (rischi tecnologici, ambientali, finanziari), caratterizzati da incertezza e dalla non assicurabilità. Nella società del rischio, la conoscenza scientifica tradizionale fatica a fornire risposte certe su questi rischi; anzi, spesso la scienza produce nuove incertezze man mano che scopre effetti collaterali (da qui il termine di Beck *"manufactured uncertainties"* usato nel libro "World Risk Society" del 1999, p.19). David Garland osserva che "il rischio comincia dove finisce la conoscenza certa" (2003, p.50) e che molte affermazioni di rischio sono in realtà affermazioni di conoscenza incerta. Per lui, la società del rischio è caratterizzata da incertezza radicale e incalcolabile, al punto che i meccanismi classici di calcolo del rischio vanno in crisi. Ad esempio, nel contesto di un cambiamento climatico potenzialmente catastrofico, le compagnie assicurative trovano difficile modellare i rischi a lungo termine, e i governi devono prendere decisioni in condizioni di incompletezza conoscitiva. Beck nota anche che i rischi globali sfidano le strutture di potere tradizionali: la scienza perde il monopolio dell'interpretazione, emergono nuovi attori e la politica diventa un gioco di potere basato sulle regole del dubbio e dell'incertezza.

Nelle sue interviste, Beck sottolineava come non fossimo teoricamente preparati ad affrontare rischi e incertezze globali aperti, perché le nostre teorie sociali erano fissate sull'idea di progresso lineare e controllo. Questa visione di Beck implica che la comunicazione dell'incertezza climatica non è solo un problema tecnico, ma anche politico-culturale. Viviamo in un'epoca in cui l'opinione pubblica è consapevole che la scienza non ha tutte le risposte e, anzi, può generare timori (si pensi agli scenari di geoingegneria o ai tipping points climatici). Allo stesso tempo, c'è sfiducia verso le istituzioni esperte se queste vengono percepite come opache sulle incertezze o, al contrario, troppo allarmiste. In tale contesto, approcci come la scienza post-normale possono contribuire a democratizzare la conoscenza del rischio: le narrazioni plausibili possono essere discusse dai cittadini, comprendendone assunzioni e conseguenze, più facilmente di quanto non possano esserlo grafici probabilistici.

In conclusione, la *risk society* e la scienza post-normale convergono nell'indicare la necessità di ampliare l'orizzonte con cui trattiamo l'incertezza del clima. Esse non

rifiutano la quantificazione o il rigore scientifico, ma li inseriscono in un contesto più partecipativo e consapevole delle implicazioni sociali. Il messaggio comune è che in problemi come il cambiamento climatico, gestire l'incertezza non significa solo calcolare meglio le probabilità, ma anche comunicare in modo più incisivo e inclusivo ciò che sappiamo e ciò che non sappiamo, e incorporare tale consapevolezza nei processi decisionali collettivi.

Capitolo 4 - L'incertezza scientifica nella didattica delle scienze

Nei capitoli precedenti abbiamo visto come la comunità scientifica abbracci l'incertezza come parte integrante del proprio lavoro: l'attività di modellizzazione, in fisica e in climatologia, procede attraverso rappresentazioni parziali e adeguate allo scopo, dati incompleti e risultati espressi in termini di intervalli, scenari e gradi di probabilità. Abbiamo anche visto come i rapporti IPCC rendano esplicita questa dimensione attraverso il framework di *likelihood* e *confidence*, il ricorso a più linee di evidenza e la riflessione sulla forza della base di conoscenze. Per contro, numerose ricerche in educazione scientifica e in comunicazione del rischio (Covitt & Anderson, 2022; Lewandowsky et al., 2015; Rosenberg et al., 2022) mostrano che, fuori dalla comunità scientifica, la scienza è spesso percepita come un *corpus* di fatti certi e immutabili: sia il pubblico che molti studenti tendono a valutare la buona scienza in termini di assenza di disaccordo, correzioni o cambiamenti di posizione.

La crisi climatica, discussa nei capitoli precedenti come esempio di rischio prodotto nella società del rischio (Beck, 1992), rendono particolarmente visibile questa tensione. In questi contesti il quadro di fondo è relativamente stabile – ad esempio, l'evidenza sul ruolo antropico nel riscaldamento globale – ma permangono incertezze sui dettagli, sui tempi e sugli impatti locali (Kampourakis & McCain, 2019). Il dibattito legittimo fra scienziati su questi aspetti e l'aggiornamento delle raccomandazioni alla luce di nuovi dati vengono però spesso interpretati dal pubblico come contraddizioni o dietrofront inspiegabili, come si è visto nella prima fase della pandemia, in cui i cambiamenti di posizione su mascherine, vaccini o misure di contenimento sono stati letti come segno di incompetenza più che come fisiologica revisione delle conoscenze (Dudley et al., 2021; Nagler et al., 2020; Rosenberg et al., 2022). In altre parole, ciò che per gli scienziati è un normale uso dell'incertezza come motore di avanzamento e di cautela decisionale rischia di essere letto come segno di inaffidabilità.

Questo quadro ha conseguenze dirette per la didattica delle scienze – e in particolare della fisica, che costituisce il contesto principale di questo lavoro. Nella scuola secondaria la fisica viene spesso presentata attraverso problemi chiusi con dati completi, esperimenti da manuale con esito previsto e leggi formulate in modo astorico e apodittico. Un'impostazione di questo tipo tende a rafforzare l'idea che la scienza fornisca risposte esatte e definitive, in tensione con l'immagine di scienza incerta ma rigorosa che emerge dalla pratica della modellizzazione e dai report IPCC, così come dalle situazioni reali di gestione del rischio climatico (Hodson, 2011; Kampourakis & McCain, 2019). Il divario fra queste due immagini – la scienza viva, attraversata da incertezze e revisioni, e la scienza scolastica, presentata come corpus di certezze – è il problema di partenza di questo capitolo.

Alla luce di queste considerazioni, appare evidente come l'educazione scientifica debba far fronte a un duplice compito: da un lato, trasmettere la natura dell'incertezza scientifica in modo che gli studenti (futuri cittadini) ne comprendano il significato e non la interpretino come ignoranza o arbitrietà; dall'altro, fornire strategie cognitive e pratiche per gestire l'incertezza nelle situazioni di apprendimento e di decisione reale. Nel seguito utilizzeremo il quadro concettuale costruito nei capitoli 2 e 3 per analizzare che cosa significhi, per studenti e insegnanti, confrontarsi con l'incertezza in classe. Discuteremo sia come gli studenti percepiscono e interpretano l'incertezza, sia alcune proposte didattiche che cercano di integrarla esplicitamente nei percorsi di fisica e di educazione al cambiamento climatico, per poi riflettere sulle implicazioni di tali approcci per la formazione di una cittadinanza capace di prendere decisioni informate in una società caratterizzata da rischi globali e decisioni complesse

4.1 Il vissuto dell'incertezza da parte degli studenti

Molti studi di didattica delle scienze concordano sul fatto che gli studenti, a vari livelli scolastici, tendono a vedere la scienza principalmente come un insieme di conoscenze certe da apprendere, più che come un processo in evoluzione con elementi di incertezza. Questa percezione è in parte il risultato di come la scienza viene insegnata (conoscenze da studiare su manuali, esperimenti scolastici con esiti attesi e problemi chiusi) e in parte riflette un comprensibile bisogno psicologico di certezze durante l'apprendimento. Di conseguenza, quando gli studenti incontrano l'incertezza scientifica possono provare disagio o confusione, non riconoscendola come parte naturale del sapere scientifico. Jordan e Babrow (2013) sostengono invece che l'incertezza è vitale per il processo di apprendimento, proprio perché genera momenti nei quali gli studenti devono confrontarsi con i limiti delle loro conoscenze e strategie; è in questi momenti di impasse che, faticando, possono acquisire nuove conoscenze e giungere a nuove comprensioni. In altre parole, un pizzico di incertezza – ad esempio di fronte a un fenomeno inatteso o a dati che non quadrano – costringe lo studente a riflettere più a fondo, a rivedere le proprie idee e ad apprendere attivamente, invece di limitarsi a recepire passivamente una soluzione già pronta. Tuttavia, Watkins e colleghi (2018) hanno segnalato che questi fruttuosi momenti di incertezza sono rari, perché l'impostazione didattica tende a evitarli. Essi, facendo una analisi incrociata di otto video tratti da contesti diversi (scuola primaria e universitari), hanno notato che spesso gli studenti non hanno occasioni guidate per esprimere il disagio riguardo alla propria comprensione e articolare le lacune o incongruenze rispetto al sapere scientifico target. Ciò è un peccato, poiché riconoscere di non capire qualcosa è il primo passo per imparare davvero (Chen et al., 2019; Jordan, 2015; Jordan & Babrow, 2013; Kirch, 2010; Watkins et al. 2018;). Un clima educativo che valorizzi l'incertezza come parte del percorso potrebbe aiutare gli studenti a sviluppare l'*epistemic reflexivity*, ossia la

capacità di riflettere intenzionalmente sui propri scopi epistemici, sui processi con cui si costruisce conoscenza, sui criteri con cui la si valuta, e sul carattere incerto del sapere (Feucht et al., 2017; Foss, 2025; Lunn Brownlee et al., 2017).

Un primo filone di studi riguarda le concezioni generali degli studenti sulla natura della scienza e, in particolare, sul rapporto tra scienza e certezza. Ad esempio, Carey e Smith (1993) hanno rivisto dati provenienti da diverse ricerche condotte con studenti di scuola media e superiore, analizzati attraverso interviste e questionari sulla natura della conoscenza scientifica. Il quadro che emerge è quello di una epistemologia del senso comune in cui la scienza è vista come un insieme di fatti veri e definitivi, accumulati una volta per tutte, mentre l'idea di scienza come pratica di costruzione e revisione teorica rimane perlopiù estranea. Secondo lo studio, gli studenti tendono a pensare che gli scienziati scoprano verità già esistenti, piuttosto che essi creino modelli fallibili soggetti a revisione, e questo alimenta una visione della scienza scolpita nella pietra, in cui l'incertezza è percepita come difetto o fallimento del lavoro scientifico.

Un secondo filone si concentra su come gli studenti vivono l'incertezza quando sono coinvolti in attività d'indagine aperta o in pratiche argomentative. Il lavoro di Manz e Suárez (2018), ad esempio, si colloca in un progetto di sviluppo professionale con insegnanti di scuola primaria, mirato ad aiutarli ad adattare le unità di scienze in modo da rendere esplicita l'incertezza insita nelle indagini scientifiche. Attraverso l'analisi di casi in cui gli insegnanti co-progettano e implementano attività di indagine e piccoli progetti di ingegneria con le loro classi, gli autori mostrano come, nelle fasi iniziali, studenti e docenti vivano l'incertezza come qualcosa di scomodo – un segnale che la lezione non sta funzionando o che manca la risposta giusta. Progressivamente, però, quando gli insegnanti imparano a cominciare da fenomeni complessi, a iterare le indagini e a valorizzare la variabilità delle idee degli studenti, l'incertezza viene negoziata collettivamente e diventa un'occasione per discutere le differenze tra interpretazioni, rivedere i piani di indagine e raffinare spiegazioni e modelli.

Un terzo filone di ricerca evidenzia le difficoltà degli studenti nel trattare l'incertezza quantitativa, legata a dati incompleti, misure approssimate o informazioni probabilistiche. Covitt e Anderson (2022), attraverso una serie di studi di *design-based research*³, hanno lavorato in classi della scuola dell'obbligo su casi di inquinamento delle acque sotterranee. Dopo un percorso in cui si è esplicitamente introdotta l'idea che l'incertezza fosse divisibile in incertezza quantitativa (errori, intervalli, test statistici), incertezza qualitativa (ipotesi alternative, limiti dei dati,

³ **Design-based research (DBR):** è una metodologia in cui i ricercatori partono da un problema autentico, su questo progettano un intervento didattico basato su teorie esistenti, lo sperimentano in classe, osservando con attenzione cosa succede, e analizzano i risultati per capire cosa ha funzionato e cosa no. A questo punto riprogettano e migliorano l'intervento e ripetono il ciclo.

domande aperte) e problemi di fiducia e affidabilità, sostenendo che la didattica dovrebbe esplicitare queste dimensioni invece di cancellarle, agli studenti è stato chiesto di analizzare una mappa di concentrazione di inquinante e di indicare in quali punti la stima fosse più incerta. Al post-test, solo una minoranza (circa il 18%) ha identificato correttamente le zone con meno dati come le più incerte, mentre altri hanno iniziato appena a riconoscere che un intervallo ampio di valori o una scala poco precisa implicano maggiore incertezza. Lo scopo della ricerca era quello di capire come aiutare gli studenti a vedere la scienza come uno strumento intrinsecamente incerto e limitato, ma comunque utile per orientare decisioni su problemi socio-scientifici complessi come clima, acqua e pandemie. Il risultato finale suggerisce che, pur avendo il potenziale per ragionare su fonti e gradi di incertezza, molti studenti non sono abituati a farlo e faticano a collegare la qualità dei dati alla fiducia nelle conclusioni.

Difficoltà analoghe emergono quando l'incertezza è espressa in termini probabilistici. Numerosi studi di psicologia cognitiva (Gigerenzer et al., 2005; Joslyn et al., 2009; Joslyn & Savelli, 2010; Juanchich & Sirota, 2016; Murphy et al., 1980) hanno mostrato che il pubblico interpreta spesso male espressioni come '30% di probabilità di pioggia', leggendo la percentuale come proporzione di area o di tempo invece che come probabilità dell'evento. In ambito più generale, van der Bles e colleghi (2020) hanno condotto diversi esperimenti con campioni di popolazione adulta, presentando dati numerici (ad esempio stime statistiche in campo sanitario o economico) con o senza indicazioni esplicite di incertezza, sotto forma di intervalli o formule verbali. I risultati mostrano che, quando si comunica incertezza, le persone percepiscono effettivamente i dati come più incerti, e la fiducia nei numeri e nella fonte può diminuire leggermente – soprattutto nel caso di formulazioni verbali vaghe – ma l'effetto è in genere modesto. Tuttavia, proprio il fatto che l'introduzione di intervalli o range richieda uno sforzo interpretativo aggiuntivo indica che, in assenza di familiarità con questi strumenti, l'incertezza numerica rischia di essere vissuta come un ostacolo piuttosto che come una risorsa per una valutazione più raffinata.

Nel complesso, questi studi suggeriscono che il vissuto dell'incertezza da parte degli studenti e degli adulti è segnato da una concezione di buona scienza come sapere certo e stabilizzato. L'abilità di tollerare e gestire l'incertezza appare quindi come una competenza che può essere coltivata gradualmente, intrecciando aspetti cognitivi (comprendere fonti e gradi di incertezza), epistemici (capire cosa rende una conclusione più o meno affidabile) e affettivi (passare dall'ansia al vedere l'incertezza come occasione di ulteriore indagine). Nel seguito del capitolo, le proposte didattiche che discuteremo si inseriscono proprio in questa prospettiva di sviluppo progressivo di competenze di convivenza con l'incertezza.

4.2 Strategie didattiche per affrontare l'incertezza

Diverse ricerche in didattica e interventi sperimentali suggeriscono che l'incertezza, se opportunamente introdotta, può diventare un potente strumento pedagogico. Invece di evitarla, gli insegnanti possono creare deliberatamente situazioni incerte in cui gli studenti sono chiamati a esplorare, discutere e costruire attivamente conoscenza. In questa sezione passeremo in rassegna alcune strategie chiave: l'uso dell'argomentazione scientifica in classe per gestire l'incertezza, l'integrazione di problemi complessi e approcci narrativi (storyline) per abituare gli studenti a contesti reali incerti, e l'educazione al ragionamento probabilistico (anche attraverso elementi di approccio bayesiano) per sviluppare una comprensione più sfumata della certezza scientifica.

4.2.1 Argomentazione scientifica e gestione dell'incertezza

L'argomentazione scientifica – intesa come il dibattito critico basato su evidenze e ragionamenti – è riconosciuta come pratica centrale della scienza e al tempo stesso come potente strategia di apprendimento. Una serie di studi condotti da Ying-Chih Chen (Chen et al., 2019; Chen, 2020; Chen & Qiao, 2020) offre un quadro particolarmente utile di cosa significhi gestire in modo intenzionale l'incertezza nelle discussioni scientifiche in classe.

Nel primo lavoro, Chen e colleghi (2019) analizzano videoregistrazioni di discussioni argomentative in due classi di scuola media negli Stati Uniti, all'interno di percorsi di scienze progettati in chiave *design-based* in cui gli autori co-progettano con i docenti unità di insegnamento (su ecosistemi e trasferimento di energia in modalità calore) e gli studenti sono chiamati a discutere evidenze parziali e a costruire argomentazioni condivise. L'obiettivo è spostare l'attenzione dalla sola struttura formale degli argomenti a come insegnanti e studenti trattano l'incertezza che emerge quando si cerca di spiegare un fenomeno. L'analisi qualitativa dei dialoghi – 24 discussioni plenarie in cui gli studenti presentano e discutono argomenti su fenomeni naturali – porta gli autori a concettualizzare l'argomentazione come un processo di gestione dell'incertezza e a identificare un ciclo didattico ricorrente in cui l'insegnante prima solleva l'incertezza proponendo fenomeni ambigui o mettendo in luce contraddizioni tra le idee degli studenti, poi mantiene l'incertezza invece di chiudere subito la questione, ponendo domande che mettono in crisi spiegazioni parziali o incoerenti, e infine riduce l'incertezza aiutando la classe a sintetizzare quanto emerso e a connetterlo con la conoscenza scientifica di riferimento. Quando questo ciclo viene orchestrato con cura, l'incertezza non blocca ma genera momenti proficui in cui gli studenti collaborano nel dialogo, rendono esplicite le proprie concezioni ingenue e le riorganizzano progressivamente verso spiegazioni scientifiche più coerenti.

Nel lavoro successivo, Chen (2020) approfondisce questo quadro seguendo longitudinalmente una classe quinta di scuola primaria americana per circa venti settimane, durante tre unità di scienze su ecosistemi, corpo umano e ciclo giorno-notte. L'obiettivo qui è mettere a fuoco le dinamiche di *accountability*⁴ che sostengono, o ostacolano, l'uso produttivo dell'incertezza. Attraverso una microanalisi etnografica⁵ di quindici discussioni plenarie, Chen mostra come i modi di gestire l'incertezza evolvano nel tempo lungo tre “percorsi dialogici”: nelle prime fasi domina un percorso *teacher-scaffolded*, in cui è l'insegnante a sollevare l'incertezza, decidere che cosa conta come evidenza e guidare strettamente il discorso; nella fase intermedia il controllo del dialogo si sposta avanti e indietro tra insegnante e studenti; infine, nelle fasi più avanzate, si arriva a percorsi *student-led*, in cui sono gli stessi studenti a riconoscere punti di incertezza, a porre domande, a criticare le spiegazioni dei compagni, mentre l'insegnante assume soprattutto un ruolo di regia e legittimazione. Anche in un contesto di scuola primaria, quindi, l'incertezza può diventare un motore di partecipazione argomentativa sofisticata.

Infine, nel terzo studio, Chen e Qiao (2020) si concentrano più direttamente sull'incertezza epistemica degli studenti, cioè la loro consapevolezza di non sapere bene come spiegare un fenomeno o giustificare un argomento. Anche qui il contesto è una classe quinta di primaria statunitense, seguita per sedici settimane durante unità su ecosistemi e sistemi del corpo umano; il corpus di dati comprende dodici discussioni plenarie in cui i gruppi di studenti presentano i propri argomenti e rispondono alle domande dei pari. L'analisi ricostruisce diversi episodi in cui dubbi, esitazioni e conflitti interni nelle spiegazioni degli studenti diventano occasioni per avanzare nella costruzione di conoscenza, a condizione che l'insegnante li riconosca e li tratti come risorse, non come errori da eliminare in fretta. In questi casi, l'incertezza aiuta gli studenti a integrare conoscenze pregresse e nuove informazioni disciplinari, a prestare attenzione alle formulazioni dei compagni e a utilizzarle come risorse condivise, e a rafforzare competenze argomentative come l'uso di prove e la coerenza interna delle spiegazioni. Chen e Qiao sottolineano che questa trasformazione dell'incertezza in risorsa richiede di considerare con attenzione lo stato delle conoscenze degli studenti, il loro livello di consapevolezza di non sapere e le modalità con cui l'incertezza viene risolta (critica reciproca, revisione delle idee, negoziazione collettiva).

Nel complesso, i tre studi convergono nel mostrare che l'incertezza, se resa visibile e gestita intenzionalmente, può diventare il cuore di ambienti argomentativi in cui gli

⁴ **Accountability:** dover rendere conto di quello che fai o dici a qualcun altro, secondo certi standard.

⁵ **Analisi etnografica:** è un metodo di ricerca qualitativa che studia quello che succede dal vivo in un contesto (una classe, un laboratorio, una comunità) come se fosse una piccola cultura, cercando di capire come le persone agiscono, parlano e danno senso a quello che fanno dall'interno, nel loro ambiente naturale.

studenti non solo apprendono contenuti scientifici, ma sviluppano anche una più matura comprensione epistemica del fare scienza a scuola.

In particolare, Chen e colleghi (2019) riportano che momenti di incertezza creati e gestiti in questo modo “hanno prodotto momenti proficui in cui gli studenti collaborano nel dialogo e orientano la propria comprensione dei fenomeni verso spiegazioni scientifiche più coerenti” (traduzione dall’abstract in Chen et al., 2019, p. 1235). L’incertezza, dunque, non paralizza la classe, ma la rende più dialogica, facendo sentire gli studenti autorizzati a esprimere dubbie e a mettere in discussione idee – il che è esattamente il comportamento dello scienziato in cerca di verità.

È importante che la gestione dell’incertezza sia calibrata sul livello di padronanza della materia da parte degli studenti perché la capacità di trarre beneficio dall’incertezza dipende sia dalla loro conoscenza pregressa sia dalla comprensione di cosa conti come prova o ragionamento valido. Se gli studenti non hanno chiari i criteri per valutare un’argomentazione (ad es. cosa distingue un dato da un’opinione, o una deduzione valida da una fallacia), il docente dovrà prima aiutarli a sviluppare questa cassetta degli attrezzi epistemica. Non a caso, Chen e colleghi (2019) parlano di “*epistemic understanding of argument*” (p.1241) come risorsa intrecciata alla negoziazione sociale: gli studenti imparano a maneggiare l’incertezza se sanno cosa significa argomentare scientificamente, e viceversa allenano questa competenza nel farlo.

Inoltre, incorporare l’argomentazione nelle lezioni, con i suoi momenti di incertezza, abitua gli studenti all’idea che non sapere subito la risposta è normale e che le conoscenze scientifiche non cadono dal cielo ma si costruiscono attraverso un processo di confronto di idee e di evidenze. Questo può contribuire a ridurre l’ansia da risposta giusta e a sviluppare una postura più esplorativa. Specialmente per i futuri cittadini, sperimentare in classe un confronto per costruire un consenso è educativo, in quanto ricorda da vicino il modo in cui la comunità scientifica opera per arrivare a conclusioni condivise. In conclusione, la strategia dell’argomentazione scientifica guidata consente di trasformare l’incertezza da tabù didattico in occasione di apprendimento.

Come sintetizzato efficacemente da Osborne e Patterson (2011), se in un’aula scientifica l’incertezza è ben orchestrata, allora si sta imparando realmente scienza, non solo ascoltando scienza.

4.2.2 Approcci storyline e problemi complessi

Un secondo filone di strategie didattiche per affrontare l’incertezza consiste nell’introdurre a scuola situazioni e problemi ispirati al mondo reale, con tutta la loro complessità e indeterminatezza, piuttosto che limitarci a esempi semplificati. Questo significa, ad esempio, proporre *wicked problems* (intrinsecamente difficili da definire

e risolvere, come il cambiamento climatico, la gestione di una pandemia, la sostenibilità energetica) e utilizzare approcci narrativi come le *storyline* per costruire unità didattiche coinvolgenti.

L'espressione *wicked problems* venne coniata da Rittel e Webber (1973) nell'ambito della pianificazione urbana per indicare problemi che non hanno una formulazione univoca, che non hanno una soluzione vera o falsa, ma le cui possibili soluzioni sono più o meno soddisfacenti, e in cui ogni intervento modifica il problema stesso. La pandemia e il cambiamento climatico sono due esempi paradigmatici di *wicked problems* perché, in entrambi i casi, le cause sono distribuite nello spazio e nel tempo, gli impatti sono molteplici e intrecciati con dinamiche economiche e politiche, e gli attori coinvolti hanno valori e interessi diversi.

Su questo sfondo, Pietrocola e colleghi (2021) hanno analizzato la pandemia come occasione per ripensare la funzione dell'educazione scientifica nella *risk society*. Anche loro osservano come la scuola abitui gli studenti a problemi ben definiti, con dati completi e una procedura standard per arrivare alla risposta corretta, lasciandoli però poco preparati a gestire situazioni reali caratterizzate da incertezza, dati mancanti e conflitti di valore. A partire da un'analisi teorica della pandemia e del concetto di rischio, gli autori propongono due direzioni operative: integrare nei curricula problemi di tipo *wicked*, e utilizzare uno schema multidimensionale di percezione del rischio per aiutare gli studenti a collocare i rischi lungo più dimensioni (gravità, controllo percepito, fiducia nelle istituzioni, prossimità temporale e spaziale, ecc.). Il messaggio è che senza un allenamento a ragionare su problemi aperti e conflittuali, gli studenti rischiano di sentirsi impotenti e di rifugiarsi in semplificazioni o negazioni.

Anche nell'articolo di Covitt e Anderson (2022), analizzato precedentemente, l'idea di fondo è quella di sviluppare nei cittadini una fiducia informata in una scienza che non promette certezze assolute, ma offre strumenti per ragionare responsabilmente in condizioni di incertezza.

Queste indicazioni possono essere concretizzate usando il cambiamento climatico come banco di prova per educare alla complessità. Ad esempio, Miani e colleghi (2025a) hanno presentato un modulo interdisciplinare per futuri insegnanti, progettato come zona di confine tra discipline diverse (fisica, chimica, biologia, scienze sociali) per aiutarli ad abbracciare complessità e incertezze sul cambiamento climatico. Il modulo, sperimentato in una summer school internazionale con 14 studenti di magistrale provenienti da nazioni diverse (Francia, Grecia, Italia e Spagna) e con profili disciplinari diversi (Fisica, matematica, biologia, scienze naturali, computer science), tratta complessità e incertezza sia come contenuti concettuali fondamentali per capire il clima, sia come attivatori epistemologici per riflettere sulla natura della scienza, sia infine come *boundary objects* che favoriscono il dialogo tra discipline. L'analisi mostra che molti partecipanti arrivano con una visione ancora fortemente deterministica e lineare

della scienza (aspettandosi leggi chiare e previsioni univoche), ma il lavoro su casi concreti e scenari climatici li aiuta gradualmente a riconoscere intrecci, retroazioni e margini di incertezza, assumendo una visione più sistemica e meno ingenuamente newtoniana.

In un altro studio, Miani e colleghi (2025b) descrivono un corso su cambiamento climatico e decisione politica rivolto a studenti delle scuole superiori, centrato proprio sulla complessità del decision-making. Il cuore del percorso è un gioco da tavolo basato sul simulatore climatico En-ROADS, in cui gli studenti, divisi in gruppi che rappresentano diversi attori (governi, imprese, ONG, cittadini), devono negoziare pacchetti di politiche per contenere il riscaldamento globale. Attraverso questa simulazione, gli studenti sperimentano in prima persona che non esiste una soluzione tecnica unica e neutrale, ma ogni scelta comporta trade-off, distribuzioni differenti dei costi e benefici, e tensioni tra breve e lungo termine. I risultati mostrano che la consapevolezza della complessità aumenta quando gli studenti sono messi nella condizione di vedere simultaneamente più dimensioni del problema (emissioni, equità, sviluppo economico, consenso politico) e di discutere esplicitamente incertezze e valori coinvolti nelle diverse opzioni.

Nel complesso, questi lavori suggeriscono che i *wicked problems* non vanno ripuliti per essere resi scolastici, ma vanno portati in classe con la loro complessità, a patto di fornire strumenti concettuali e spazi di dialogo per non lasciare gli studenti in balia dell'ansia o del fatalismo.

In questo quadro, le *storyline* rappresentano una struttura narrativa particolarmente adatta a rendere gestibile, comprensibile e discutibile la complessità del clima. L'approccio delle *physical climate storylines* nasce all'interno della comunità climatologica come risposta alle difficoltà di comunicare scenari climatici solo tramite distribuzioni probabilistiche astratte. In lavori scritti da Shepherd e colleghi (2018) e Trenberth e colleghi (2015) è stato proposto, soprattutto nel contesto dell'attribuzione degli eventi estremi, di affiancare al tradizionale *risk-based approach* un metodo che ricostruisca storie fisicamente coerenti di come un certo evento si è prodotto o potrebbe prodursi in futuro. In questa prospettiva, una *storyline climatica* è una successione di eventi plausibili e compatibili con le leggi fisiche e con ciò che sappiamo del sistema Terra, che collega cause, processi intermedi e conseguenze in una narrazione concreta.

La differenza rispetto alla comunicazione puramente basata sul rischio è ben illustrata da Shepherd e Lloyd (2021), che discutono il problema della *meaningful climate science*⁶: le proiezioni globali mediate e le percentuali di probabilità parlano la lingua dei modelli e degli esperti, ma non necessariamente quella degli utenti finali

⁶ **Meaningful climate science:** Shepherd e Lloyd intendono un tipo di informazione climatica che non è solo tecnicamente corretta, ma che sia collegata ai contesti, ai problemi e ai valori di chi la deve usare, come decisori, comunità locali, settori economici e cittadini.

(policy maker, amministratori locali, comunità). Riprendendo un'osservazione di Jasanoff (2010), essi notano che un eccesso di astrazione stacca la conoscenza dal significato: le persone non ragionano in termini di percentili o deviazioni standard, ma di eventi concreti, luoghi familiari, esperienze vissute. La storyline, combinando dati quantitativi (ensemble di modelli, scenari di forzante, distribuzioni di temperature o precipitazioni) e dettagli qualitativi (effetti su città specifiche, infrastrutture, settori economici), si propone come una sorta di *pidgin*, un linguaggio intermedio che permette a comunità diverse di comprendersi.

Dal punto di vista epistemologico, le storylines implicano uno spostamento di accento: invece di chiederci quanto sia probabile che accada un fenomeno, potremmo chiederci come potrebbe accadere quel fenomeno e che cosa succederebbe se si verificasse uno scenario di un certo tipo. Lloyd e Oreskes (2018), analizzando il dibattito nato intorno a questo approccio, hanno mostrato come una parte della comunità di attribuzione abbia reagito con sospetto, temendo un abbassamento degli standard metodologici e un ritorno a forme di spiegazione meno rigorose. Tuttavia, gli autori hanno sostenuto che questa resistenza rischia di trascurare il fatto che in molti contesti decisionali i costi di sottostimare un rischio (falso negativo: non riconoscere per tempo un pericolo) possono essere ben maggiori dei costi di sovrastimarla leggermente (falso positivo). In regime di incertezza profonda, insistere su probabilità molto incerte può quindi essere meno utile che esplorare in modo esplicito una pluralità di scenari plausibili, chiarendo rischi e implicazioni di ognuno.

In sintesi, l'approccio storyline non elimina l'incertezza ma la riorganizza. Invece di chiedere al pubblico di interpretare bande, box-plot e percentuali, offre una serie di storie condizionali che possono essere discusse, comparate e usate per progettare strategie che funzionano in molti scenari diversi. Proprio per questa combinazione di rigore fisico e potere narrativo, le physical climate storylines sono state riprese e adattate in ambito educativo.

Miani e Levrini (2024) esplorano esplicitamente l'uso di storyline climatiche nella didattica, con l'obiettivo di sviluppare competenze di sostenibilità negli studenti di scuola superiore. In un capitolo del libro Teaching and Learning Physics Effectively in Challenging Times (pp. 253-266), gli autori esplorano l'approccio storyline non tanto presentando una sperimentazione in classe, quanto analizzandone in modo teorico il potenziale formativo rispetto allo sviluppo di competenze di sostenibilità. Nel loro contributo, essi mettono a confronto il *risk-based approach* e lo *storyline approach*, rileggendoli attraverso la lente del framework europeo GreenComp⁷: a

⁷ **GreenComp:** Quadro europeo di competenze per la sostenibilità, pubblicato dalla Commissione Europea nel 2022. È una griglia di 12 competenze che descrivono cosa dovrebbe saper fare un cittadino per vivere e agire in modo sostenibile; è pensato in modo trasversale alle discipline (non solo scienze, ma anche educazione civica, lettere, ecc.); è usato come lente per progettare e analizzare percorsi educativi sulla sostenibilità.

partire dalle dodici competenze individuate da GreenComp, gli autori formulano una serie di domande guida e le usano per una lettura mirata dei lavori chiave su FAR⁸ e storylines (Allen, 2003; Shepherd, 2019; Stott et al., 2004; Trenberth et al. 2018; ecc.), in modo da valutare in che misura ciascun approccio supporti valori di sostenibilità, lettura della complessità, immaginazione di futuri alternativi e agency.

L'analisi mostra che entrambi gli approcci possono contribuire a sensibilizzare sui rischi climatici, ma in modi differenti. Il *risk-based approach*, fondato su stime probabilistiche e sul controllo degli errori di tipo I e II, appare più allineato a un ideale di accuratezza statistica e di cautela nel dichiarare l'influenza antropica; al tempo stesso, l'uso intensivo di modelli e simulazioni può produrre un effetto black box che rende meno trasparenti i nessi causali tra i diversi fattori del sistema climatico.

L'approccio delle *storyline*, al contrario, viene descritto come maggiormente coerente con le richieste della letteratura sull'educazione al cambiamento climatico in termini di lettura della complessità e sviluppo di competenze sistemiche (Greer et al., 2021; Monroe et al., 2019; Rousell et al., 2020). Infatti, costruendo un'autopsia di eventi specifici e ricostruendo le catene causali che li hanno prodotti, le storylines permettono di distinguere diversi tipi di incertezza (sul forzante futuro, sulla risposta del sistema, sulla variabilità interna) e di collegare fattori fisici, impatti locali e possibili leve di intervento. Inoltre, mettendo l'accento su scenari plausibili e sul nesso tra eventi estremi e azioni di prevenzione/adattamento, l'approccio storyline si presta – secondo gli autori – a sostenere forme di *futures thinking*, di esplorazione di futuri possibili (*foresight, backcasting*) e di agency sia personale che politica. Nelle conclusioni, Miani e Levrini suggeriscono che rileggere le storylines climatiche da una prospettiva educativa e tradurle in sequenze di insegnamento potrebbe essere una via promettente per promuovere pensiero sistematico e capacità di azione trasformativa sulla crisi climatica.

Un esempio di unità didattica che traduce in pratica l'approccio storyline, prendendo spunto dalla descrizione fatta da Shepherd (2019), potrebbe prendere come caso di studio l'ondata di caldo europea del 2003. Invece di presentare solo qualche dato di temperatura e un generico commento sul clima che cambia, il percorso può essere organizzato come un'indagine strutturata in cui gli studenti ricostruiscono prima che cosa è accaduto (andamento delle temperature, anomalie rispetto alla climatologia, impatti su mortalità, agricoltura, infrastrutture), poi si confrontano con la domanda – tipica degli studi di attribuzione – se e in che misura l'evento possa essere collegato al cambiamento climatico antropico. Infine, vengono introdotti scenari controllattuali, sulla scia degli studi che confrontano il mondo così com'è con un mondo ipotetico senza aumento di gas serra, mostrando come cambiano la frequenza e l'intensità di eventi simili (Lloyd, 2018; Stott et al., 2004).

⁸ **FAR:** Fraction of Attributable Risk. Serve a quantificare quanto l'attività umana ha aumentato il rischio di un certo evento estremo

In un'unità di questo tipo, la storyline non è una semplice narrazione evocativa, ma una sequenza fisicamente coerente di passaggi: condizioni iniziali (stato del suolo, circolazione atmosferica, siccità precedente), sviluppo dell'onda di caldo, effetti sui diversi settori sociali, possibili misure di adattamento e prevenzione. Lavorando su dati storici semplificati, carte meteorologiche e risultati qualitativi di simulazioni, gli studenti possono discutere spiegazioni alternative (variabilità naturale vs contributo antropico) e ricostruire le catene causali che collegano fattori fisici e impatti sociali. Il caso del 2003 si presta bene anche a far emergere, in modo esplicito, diversi tipi di incertezza discussi nella letteratura sul clima (Dessai & Hulme, 2004; Lloyd, 2018; Wüthrich, 2020): l'incertezza riflessiva (non sappiamo quali traiettorie emissive future si realizzeranno), l'incertezza epistemica sui processi (quanto conosciamo davvero il ruolo di certe configurazioni atmosferiche o delle condizioni del suolo) e l'incertezza aleatoria legata alla variabilità interna del sistema. In questo modo, la storyline sul 2003 diventa un terreno concreto in cui gli studenti possono vedere come si intrecciano conoscenza del sistema, analisi degli impatti e riflessione sull'incertezza, collegando le astrazioni climatiche a un evento storicamente documentato.

Il quadro riportato da Miani e Levrini (2024) mette le sue basi nel lavoro di ricerca condotto all'interno del progetto europeo I SEE (Inquiry into Scenarios to Enhance Education), descritto da Branchetti e colleghi (2018), che propone di far tendere al futuro l'educazione scientifica introducendo in classe l'analisi di scenari futuri relativi a scienza, tecnologia e problemi globali. Le storyline non sono quindi solo racconti climatici, ma veri e propri scenari multi-attore in cui gli studenti devono proiettarsi in futuri possibili, discutere conseguenze di scelte diverse e riconoscere che non esiste un futuro predeterminato ma molti futuri possibili, dipendenti dalle decisioni collettive. Questo lavoro sulle storie future può contribuire alla riduzione della distanza psicologica percepita dagli studenti rispetto ai cambiamenti climatici a contrastare atteggiamenti fatalistici, restituendo agli studenti un senso di possibilità e responsabilità.

Letti insieme, gli studi su wicked problems e storyline mostrano una convergenza importante: la didattica dell'incertezza non consiste nel togliere complessità, ma nel renderla discernibile e discutibile. Problemi come il cambiamento climatico o le pandemie vengono trasformati in trame narrative e in spazi di decisione in cui gli studenti possono vedere che esistono molteplici scenari e tipi di incertezza, argomentare su quale livello di precauzione sia ragionevole, e riconoscere che la scienza non fornisce un copione già scritto, ma strumenti per immaginare e valutare futuri alternativi.

In termini teorici, oggetti come scenari, giochi di simulazione, grafici climatici o storylines possono essere letti come *boundary objects* (Akkerman & Bakker, 2011), in quanto artefatti sufficientemente robusti da essere riconosciuti da comunità diverse (scienziati, studenti, decisori) ma abbastanza plasti da essere reinterpretati e discussi in modi differenti. In questa funzione, essi permettono di attraversare i

confini tra discipline, tra scienza e politica, tra aula e mondo, facendo dell'incertezza non un difetto da nascondere ma il terreno condiviso su cui costruire nuove forme di alfabetizzazione scientifica e climatica.

4.2.3 Ragionamento probabilistico e approccio bayesiano

Se i problemi complessi e le storyline aiutano gli studenti a vedere che il futuro non è già scritto e determinato e che esistono molti scenari possibili, una didattica dell'incertezza non può fermarsi qui perché occorre fornire anche strumenti per ragionare in modo quantitativo su queste possibilità. Alla domanda "che cosa potrebbe succedere?" deve affiancarsi, almeno in parte, la domanda "con quale grado di probabilità o di credibilità?". Proprio perché gli studenti vengono messi a confronto con scenari alternativi e rischi comparabili, diventa evidente che prima o poi bisogna saper pesare le alternative e interpretare percentuali, intervalli e indicatori di rischio.

Un'ulteriore strategia didattica per affrontare l'incertezza in modo esplicito è insegnare agli studenti a ragionare in termini probabilistici, fornendo loro strumenti concettuali per comprendere gradi di incertezza e aggiornare le proprie convinzioni con nuove evidenze. Tradizionalmente, la probabilità e la statistica entrano nei programmi scolastici come argomenti di matematica astratti (calcolo delle probabilità, distribuzioni, ecc.), spesso sganciati dal contesto scientifico. In un'ottica di cittadinanza scientifica, bisognerebbe forse adottare un taglio più applicativo e concettuale, trattando la probabilità come linguaggio dell'incertezza scientifica.

Rosenberg e colleghi (2022), ad esempio, avanzano l'idea di utilizzare un approccio bayesiano semplificato per aiutare gli studenti a concepire le credenze scientifiche come gradi di confidenza che si aggiornano alla luce di nuove evidenze.

Inizialmente, gli autori descrivono che l'attività è pensata per contesti K-12⁹, in cui gli studenti sono guidati a esplicitare un prima (una stima iniziale) e un dopo (la revisione della stima in seguito a nuovi dati); l'idea chiave è quella di interpretare la probabilità come grado di credenza razionale in un'ipotesi, che può essere aggiornata man mano che si ottengono nuovi dati. Presentato a livello intuitivo, questo concetto può rispondere a domande del tipo: "Quanto dovremmo fidarci di questa ipotesi alla luce delle prove a disposizione? E come cambia la nostra fiducia se arrivano nuove prove?". Rosenberg e colleghi sostengono che guardare alla conoscenza scientifica in termini di gradi di credenza (invece che come semplicemente vera/falsa) possa aiutare a costruire fiducia nella scienza presso gli studenti. Infatti, se gli allievi capiscono che ogni conclusione scientifica ha un certo margine di incertezza e che è normale aggiornarla con nuovi dati, saranno meno

⁹ **K-12**: è un'etichetta tipica del mondo anglosassone per indicare tutta la scuola, dall'infanzia all'ultimo anno delle superiori.

sorpresi o disorientati quando vedono scienziati cambiare opinione alla luce di nuove scoperte (si pensi ancora all'esempio della pandemia: una raccomandazione sui vaccini o sulle mascherine si modifica con ulteriori studi – ciò non significa che la scienza si è sbagliata, ma che ha aggiornato il grado di confidenza nelle raccomandazioni). In pratica, come si può portare un approccio probabilistico/bayesiano in classe? Rosenberg e colleghi suggeriscono tre livelli:

1. Principi ispirati al teorema di Bayes sul piano qualitativo, ad esempio discutere con gli studenti casi in cui credenze iniziali (pregiudizi) vengono corrette da evidenze, sottolineando il concetto di peso delle prove e di aggiornamento.
2. Strumenti digitali interattivi: esistono semplici simulatori o app (come il Confidence Updater¹⁰) in cui gli studenti possono inserire evidenze e vedere come cambia la probabilità di un'ipotesi. Ciò rende tangibile il processo di revisione della credenza.
3. Strategie didattiche per introdurre il pensiero bayesiano anche ai più giovani, ad esempio attraverso giochi o analogie. Un esempio concreto potrebbe essere un caso investigativo scientifico (es. identificare la causa di una malattia vegetale). Gli studenti hanno alcune ipotesi (fungo, parassita, inquinante) con relative probabilità iniziali (anche scelte un po' soggettivamente in base a quel che sanno). Poi vengono forniti progressivamente dati (es. risultati di analisi di laboratorio, sintomi osservati), e ad ogni nuovo dato, gli studenti sono guidati a rivedere la probabilità di ciascuna ipotesi – magari inizialmente qualitativamente (aumenta/diminuisce la fiducia in quella ipotesi?), poi quantitativamente con numeri semplici. Questo esercizio insegna che la scienza è un processo iterativo di aggiornamento delle conclusioni, non un atto istantaneo di scoperta della verità definitiva.

Come fanno notare gli autori, è importante mantenere il tutto accessibile: non serve insegnare il teorema di Bayes in formule agli studenti; si tratta piuttosto di far passare l'idea che ogni affermazione scientifica ha un certo livello di confidenza, e che questo livello può cambiare con nuove evidenze.

Oltre all'approccio bayesiano, in generale promuovere il pensiero probabilistico significa abituare gli studenti a frasi del tipo: “c'è un'alta probabilità che...”, “c'è una possibilità su dieci che...”. Ad esempio, in un corso di scienze della Terra si può parlare della probabilità di eruzione di un vulcano in un dato periodo, spiegando cosa significa quel numero, invece di dire solo che il vulcano è dormiente o attivo. Oppure in biologia si può discutere la probabilità di trasmissione genetica di un carattere

10 **Confidence updater:** una piccola applicazione web interattiva pensata per far sentire con mano agli studenti cosa significa aggiornare la propria fiducia in un'ipotesi quando arrivano nuove evidenze, senza dover fare i conti del teorema di Bayes a mano.

invece di dare per certo che succederà. Questo costante riferimento all'incertezza quantitativa aiuta a interiorizzare che poche cose sono assolute, e che va sempre indicato quanto siamo sicuri di un'affermazione.

Infine, un beneficio non trascurabile di insegnare la probabilità in contesto scientifico è combattere misconcezioni comuni sulla significatività statistica e sui falsi positivi, che però sono cruciali per interpretare studi scientifici (pensiamo al dibattito su test diagnostici o sulle previsioni meteo). Educando precocemente a ragionare in termini di incertezza e probabilità, formiamo cittadini più attrezzati a interpretare informazioni come la percentuale di efficacia di un farmaco o le affermazioni dell'IPCC con diversi livelli di *confidence*. Tutto ciò potrebbe insegnare a non chiedere solo se una certa affermazione sia vera o falsa ma anche con quale livello di certezza sia nota.

Per concludere, incorporare elementi di ragionamento probabilistico e bayesiano nelle scienze scolastiche aiuta a rendere esplicito l'aspetto incerto ma quantificabile del sapere scientifico. Gli studenti, lungi dall'essere destabilizzati, possono trarre da ciò una migliore comprensione di come funziona la scienza (come un processo incrementale di aggiornamento delle ipotesi) e sviluppare fiducia nella scienza intesa come metodo affidabile anche quando i singoli risultati possono cambiare man mano che aumentano le evidenze. È un antidoto alla visione ingenua della scienza onnisciente da un lato e alla sfiducia cinica dall'altro.

4.3 Implicazioni per l'educazione scientifica e la cittadinanza scientifica

L'analisi svolta finora in questo capitolo evidenzia che affrontare esplicitamente il tema dell'incertezza scientifica nell'educazione porta con sé numerose implicazioni positive, sia sul piano strettamente formativo sia su quello più ampio della costruzione di una cittadinanza consapevole e resiliente di fronte alle sfide scientifiche e tecnologiche contemporanee.

Dal punto di vista educativo, integrare l'incertezza nel curriculum significa in primo luogo allineare meglio la scuola con la natura autentica della scienza. Gli studenti escono così da quella zona protetta dove ogni problema ha un solo risultato e ogni domanda ha una risposta nel libro di testo, per entrare gradualmente nel mondo reale della ricerca e dei problemi socio-scientifici. Questo rende l'apprendimento più genuino e, paradossalmente, più solido: comprendere perché sappiamo qualcosa e quanto solidamente lo sappiamo può aiutare a costruire conoscenze meno superficiali. Gestire attivamente l'incertezza associata a certe misure porta a considerare il contesto, le assunzioni, i possibili errori – in breve, aiuta a far ragionare in modo critico. Come sostenuto da Osborne e colleghi (2003), insegnare la scienza includendo la sua dimensione di incertezza favorisce lo sviluppo di abilità di pensiero critico e di *problem solving* avanzato. Un altro effetto è motivazionale: paradossalmente, riconoscere che c'è ancora incertezza e scoperta possibile può motivare di più gli studenti verso le materie scientifiche, visto che se tutto fosse già scoperto e certo, il ruolo delle nuove generazioni di scienziati sarebbe marginale; invece, far intravedere i confini del non-saputo (i problemi aperti) stimola curiosità e desiderio di contribuire.

Sul piano della cittadinanza scientifica, l'educazione all'incertezza è essenziale per formare cittadini in grado di navigare una società del rischio. Ulrich Beck (1992) e Anthony Giddens (1990) hanno descritto la nostra epoca come caratterizzata da rischi globali creati dal progresso stesso, in cui situazioni catastrofiche non sono più l'eccezione ma una nuova normalità e in cui il passato non offre più guide sicure per orientare le azioni presenti. In questo contesto, un cittadino deve spesso prendere decisioni (o votare per decisioni) basandosi su valutazioni scientifiche probabilistiche: dal decidere se vaccinarsi, al supportare o meno politiche ambientali, passando per il dover reagire a linee guida sanitarie in evoluzione.

La pandemia di Covid-19 offre un caso emblematico di cosa accade quando i cittadini si trovano a fare i conti con incertezze scientifiche che evolvono rapidamente, senza aver sviluppato in precedenza strumenti concettuali adeguati. Pietrocola e colleghi (2021), utilizzando il quadro teorico della società del rischio di Beck, hanno condotto un'analisi documentale di testi istituzionali, interventi mediatici e materiali educativi prodotti durante la prima fase della pandemia, con l'obiettivo di interrogare i nuovi compiti della didattica delle scienze in un mondo caratterizzato dai

manufactured risks. La loro analisi mostra come il Covid-19 venga configurato come rischio globale prodotto dallo sviluppo socioeconomico, e come gli studenti siano generalmente abituati, a scuola, a problemi chiusi e decontestualizzati, che non richiedono di ragionare in termini probabilistici o di scenari alternativi. Ne deriva, secondo gli autori, un punto cieco dell'educazione scientifica in cui i cittadini non sono preparati a comprendere processi decisionali che devono bilanciare evidenze incerte, tempi stretti e impatti socialmente distribuiti, e tendono quindi a vivere l'evoluzione delle raccomandazioni come segno di incompetenza o incoerenza piuttosto che come esito normale della dinamica scientifica.

Sempre riguardo al Covid-19, Nagler e colleghi (2020) hanno documentato in modo sistematico come la percezione di informazioni in conflitto sia stata associata a confusione e sfiducia, conducendo un sondaggio rappresentativo su circa mille adulti statunitensi, con l'obiettivo di esplorare come il pubblico abbia percepito messaggi contrastanti riguardo a modalità di trasmissione, gravità dell'infezione e misure preventive. I risultati hanno mostrato che una larga maggioranza degli intervistati riferisce di aver incontrato informazioni discordanti, soprattutto attribuite a politici e media, e che chi percepisce maggior conflitto si sente meno informato, più confuso e manifesta minore fiducia nelle fonti istituzionali, con possibili ricadute negative sulla disponibilità a seguire le misure raccomandate.

Un'altra linea di ricerca si concentra sui legami tra rischio, incertezza, emozioni e ricerca di informazioni durante il periodo pandemico. Huang e Yang (2020), tramite un'indagine in due ondate su un campione di 381 partecipanti, hanno esaminato i driver psicologici che spingono a cercare informazioni durante il Covid-19. Il loro modello, che combina percezione del rischio e incertezza soggettiva, mostra che il sentirsi esposti al rischio e l'incertezza sulle proprie conoscenze predicono una maggiore ricerca di informazioni, ma che tali effetti sono mediati da emozioni come paura e speranza: in assenza di cornici interpretative robuste, l'incertezza non porta automaticamente a una ricerca informativa critica ma può anche alimentare ansia, saturazione informativa e difficoltà nel distinguere fonti autorevoli da messaggi fuorvianti.

Nel complesso, questi studi suggeriscono che, durante la pandemia, l'aggiornamento delle misure di salute pubblica — inevitabile man mano che si accumulavano nuovi dati — è stato spesso percepito come segno di incoerenza, alimentando confusione e, in alcuni casi, sfiducia nelle istituzioni scientifiche e sanitarie. Il problema, però, non risiede solo a valle, nella comunicazione di crisi, ma anche a monte, nella scarsa familiarità di molti cittadini con il carattere probabilistico e revisionabile della conoscenza scientifica.

Come notano van der Bles e colleghi (2019), comunicare l'incertezza in modo onesto non necessariamente diminuisce la fiducia del pubblico, anzi può aumentarne la credibilità se fatto adeguatamente, perché la gente percepisce che gli esperti non stanno nascondendo i limiti delle loro conoscenze. Qui entra in gioco

l'idea che l'incertezza abbia anche un valore etico e democratico, come previsto dalla proposta della scienza post-normale (Funtowicz & Ravetz, 1993). Loro sostengono che, in contesti in cui "i fatti sono incerti, i valori in disputa, le poste in gioco alte e le decisioni urgenti" (p.744), la garanzia di qualità delle conoscenze scientifiche non può essere affidata solo alle comunità esperte, ma richiede il coinvolgimento di una *extended peer community*, cioè una comunità di cittadini e stakeholder che contribuiscono con le proprie preoccupazioni, le loro conoscenze locali e i loro valori al processo di valutazione e di controllo della qualità dell'informazione scientifica. In questa prospettiva, comprendere che le affermazioni scientifiche sono intrinsecamente incerte, e come tale incertezza venga esplicitata e discussa, diventa una condizione per una partecipazione democratica non meramente simbolica ma effettiva.

Infine, dal punto di vista delle istituzioni educative e dei curricoli, includere l'incertezza richiede anche di fornire supporto ai docenti per:

- gestire discussioni aperte, in quanto non tutti gli insegnanti sono inizialmente a loro agio nel cedere controllo alla classe in momenti di incertezza (Gordon, 2006; Manz & Suárez, 2018; Windschitl, 2002; Zion & Mendelovici, 2012);
- elaborare risorse didattiche adatte, ad esempio strumenti visuali per rappresentare incertezza o linee guida per storyline disciplina;
- modificare le valutazioni in modo da premiare non solo la risposta giusta ma anche la capacità di argomentare in presenza dell'incertezza e del riconoscimento dei limiti di una conclusione.

Questo è coerente con le raccomandazioni di riforma educativa che spingono verso competenze più che contenuti: l'OCSE, ad esempio, promuove *la scientific literacy* come capacità di applicare conoscenze scientifiche per prendere decisioni tenendo conto dell'incertezza scientifica; in particolare, l'Agenda UNESCO *Education for Sustainable Development (ESD)* include esplicitamente il saper gestire complessità e incertezza come competenza chiave per i cittadini del futuro.

In conclusione, come sintetizzano Barelli e colleghi (2018), lavorare con la complessità e l'incertezza sviluppa le competenze di cittadinanza necessarie per navigare nella società. Una popolazione che capisce la differenza tra "non sappiamo tutto" e "non sappiamo niente", che sa valutare le evidenze con senso critico e capire messaggi come quelli dell'IPCC (es. cosa significa "estremamente probabile"), sarà una popolazione meno vulnerabile a disinformazione, panico o apatia di fronte alle crisi, e più pronta a sostenere decisioni informate e partecipare attivamente al dibattito pubblico su temi scientifici.

Capitolo 5 - Incertezza nel cambiamento climatico studiata dal punto di vista di studenti di Fisica

Questo capitolo introduce e discute il lavoro svolto in un focus group dedicato al tema “certezza–incertezza” nella didattica delle scienze, nato all’interno del percorso europeo del SIG-8 (ESERA) verso un manifesto di *Futures-Oriented Science Education*. L’obiettivo è quello di far emergere, con la voce di alcuni studenti di fisica, priorità e raccomandazioni su come comunicare e insegnare l’incertezza in modo pedagogicamente efficace e culturalmente consapevole.

Il caso degli studenti di fisica merita un approfondimento, sia per la natura della disciplina che per le modalità con cui è tradizionalmente insegnata. Abbiamo già parlato di come la fisica venga spesso rappresentata – nei curricula e nelle credenze degli studenti – come la scienza esemplare della certezza, fondata su leggi matematiche precise e su previsioni molto accurate. Questa immagine, in parte meritata per i successi della fisica classica, può però contribuire a generare negli studenti l’idea che in fisica tutto sia già noto o che i problemi abbiano sempre una risposta esatta predefinita, come suggerito dagli studi condotti su studenti universitari di fisica sulle credenze epistemologiche e sulle loro aspettative (Adams et al., 2006; Hammer, 1994; Redish et al., 1998).

Un primo gruppo di lavori che aiuta a comprendere le credenze degli studenti di fisica è quello inaugurato da Hammer (1994). In questo studio, l’autore ha analizzato in profondità le convinzioni epistemologiche di un piccolo gruppo di matricole iscritte a un corso universitario introduttivo di fisica, quindi studenti che stavano intraprendendo percorsi di studio in fisica o in ambiti strettamente affini (come l’ingegneria). Attraverso interviste qualitative, Hammer ha indagato come questi studenti concepissero la natura della conoscenza fisica, il ruolo delle formule e il processo di apprendimento: la conoscenza scientifica viene vista come un insieme di fatti isolati, le formule sono viste come un sistema coerente di principi, ricette da applicare o rappresentazioni sintetiche di concetti, e il processo di apprendimento è dovuto nella maggior parte dei casi ad una ricezione passiva di informazioni. I risultati mostrano che molti studenti tendono a vedere la fisica come un insieme di formule da ricordare e applicare correttamente, più che come un campo concettuale in cui i modelli vanno interpretati e messi in relazione. Questa visione, osserva Hammer, ha conseguenze dirette su come gli studenti affrontano i problemi perché se la fisica è soprattutto sapere quale formula usare, l’obiettivo diventa individuare il procedimento standard che porta alla risposta esatta, mentre l’incertezza, il dubbio e l’esplorazione di strategie alternative tendono a essere scoraggiati.

Su un campione molto più ampio di studenti di fisica, Redish e colleghi (1998) hanno sviluppato e applicato il *Maryland Physics Expectations Survey* (MPEX), un questionario a risposta *Likert*¹¹ progettato per sondare le aspettative e le credenze di studenti iscritti a corsi universitari introduttivi di fisica, in gran parte corsi di base per studenti di ingegneria e di lauree scientifiche presso grandi atenei statunitensi. L'obiettivo era quello di esplorare sistematicamente che cosa questi studenti si aspettano da un corso di fisica, come immaginano che si faccia fisica e quale ruolo attribuiscono al ragionamento personale rispetto alla semplice applicazione di procedure. I risultati mostrano che una frazione significativa degli studenti considera la fisica come una collezione di regole da applicare, vede l'insegnante come l'unica fonte legittima di conoscenza e pensa che il successo dipenda soprattutto dal seguire fedelmente esempi e schemi di soluzione. Ancora più rilevante è che, come documentano gli autori, dopo un corso tradizionale, queste credenze non migliorano in modo sostanziale e talvolta peggiorano, spostandosi ulteriormente lontano dal profilo di credenze tipico dei fisici esperti.

Adams e colleghi (2006) hanno proseguito su questa linea di ricerca introducendo il *Colorado Learning Attitudes about Science Survey* (CLASS), uno strumento pensato per misurare le credenze e gli atteggiamenti degli studenti rispetto alla fisica e al suo apprendimento in una varietà di corsi universitari, dai corsi introduttivi ai corsi più avanzati. Anche in questo caso il target principale sono studenti di fisica o di discipline che prevedono una solida formazione in fisica (in particolare ingegneria), con campioni complessivi di migliaia di studenti distribuiti su diversi contesti istituzionali. Il CLASS confronta le risposte degli studenti con quelle di un gruppo di esperti (docenti, ricercatori in fisica) per valutare quanto le loro credenze siano “*expert-like*”. I risultati confermano un quadro simile a quello emerso con il MPEX: la maggior parte degli studenti manifesta una concezione fortemente orientata al *problem solving* procedurale, una scarsa enfasi sulla coerenza concettuale e una visione dell'apprendimento come ricezione di spiegazioni chiare piuttosto che come processo di indagine e revisione delle proprie idee. Inoltre, Adams e colleghi mostrano che, se non si interviene esplicitamente sulle credenze epistemologiche, l'andamento tipico dopo un corso tradizionale è un lieve peggioramento delle risposte rispetto al profilo esperto, segno che l'esperienza didattica può consolidare queste visioni riduttive invece di metterle in discussione.

Nel complesso, questi tre studi, pur con metodologie diverse (interviste qualitative in profondità nel caso di Hammer, grandi indagini survey nel caso di Redish e colleghi e di Adams e colleghi), convergono su un punto centrale per il presente lavoro: gli studenti di fisica nei corsi universitari di base tendono a costruire l'immagine della disciplina come un corpus di conoscenze certe, organizzate in formule e algoritmi, in

¹¹ **Questionario a risposta Likert:** è un questionario in cui le risposte alle domande vengono date su una scala graduata di accordo/disaccordo (o di frequenza, o di giudizio), invece che con un semplice sì/no.

cui il compito dello studente è riprodurre correttamente procedure standard più che confrontarsi con l'incertezza, il dubbio argomentato o il carattere provvisorio dei modelli. L'incertezza, in questo quadro, appare al massimo come errore esecutivo individuale (aver sbagliato formula, aver commesso un errore di calcolo), non come componente strutturale della pratica scientifica. Questo sfondo epistemologico rende particolarmente interessante indagare come studenti di fisica interpretino, vivano e gestiscano l'incertezza quando si trovano di fronte a problemi che escono dal format dell'esercizio con risposta giusta, come quelli proposti negli scenari didattici sul cambiamento climatico.

Va inoltre ricordato che la fisica avanzata, specie in ambiti di frontiera come la fisica delle particelle e la cosmologia, è tutt'altro che esente da incertezze concettuali: la letteratura di settore discute esplicitamente i limiti del Modello Standard e le sfide aperte nel tentativo di unificare meccanica quantistica e relatività generale (Virdee, 2016; Rovelli, 2018). Tuttavia, questi aspetti di fisica non risolta raramente entrano nelle aule prima degli ultimi anni di laurea specialistica. Il curriculum standard, concentrandosi su teorie ben assodate (meccanica classica, elettromagnetismo, ecc.), può inconsapevolmente rinforzare l'idea che la fisica sia una costruzione monolitica di certezze. Perfino un concetto complesso come la meccanica quantistica viene spesso insegnato enfatizzandone il formalismo matematico e le tecniche di calcolo, mentre le principali difficoltà degli studenti riguardano proprio la capacità di collegare il formalismo alla realtà fisica e di passare da una visione deterministica a una probabilistica (Bouchée et al., 2022; Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017). Ricerche sulle difficoltà concettuali (Li et al., 2021; Sadaghiani & Bao, 2006) mostrano inoltre che molti studenti tendono a interpretare l'incertezza quantistica come semplice errore di misura e faticano a dare un significato epistemico a concetti come probabilità, distribuzione e incertezza, il che suggerisce che la dimensione probabilistica viene spesso trattata in modo operativo più che problematizzata sul piano della conoscenza.

Diversi lavori in cui sono state analizzate le idee di studenti del primo anno di fisica (Allie et al., 1998; Buffler et al., 2001; Volkwyn et al., 2008), mostrano che molti studenti di fisica in un laboratorio ragionano in un'ottica puntuale, aspettandosi un unico valore corretto, valutando la qualità dei dati soprattutto in base alla loro vicinanza alla previsione teorica e interpretando la dispersione come semplice errore o imprecisione più che come informazione utile sulla misura. In contesti di laboratorio universitario, quando un punto sperimentale non cade sulla retta attesa o i dati risultano in tensione con il modello, alcuni gruppi di studenti tendono a ignorare i risultati anomali, attribuirli a uno sbaglio o persino modificare procedure e analisi per ottenere un accordo migliore con la teoria, piuttosto che problematizzare l'incongruenza (Phillips et al., 2021; Stein et al., 2018). Questi comportamenti sono in parte incoraggiati dal modo in cui molti corsi di laboratorio sono ancora impostati, visto che l'obiettivo隐含 è sempre far tornare il risultato, più che esplorare criticamente l'incertezza. Questa dinamica è stata messa in discussione, tra gli altri,

da Holmes e Wieman (2018), che mostrano come tali laboratori non migliorino in modo misurabile la comprensione concettuale pur trasmettendo l'idea che l'esperimento serva soprattutto a confermare leggi note. In questo quadro, non sorprende che l'incertezza venga vissuta più come fastidiosa deviazione dal valore atteso che come risorsa informativa. Mentre in ricerca, un risultato inaspettato con un largo scarto dall'atteso accende curiosità (errore sistematico? nuovo fenomeno?), in classe spesso è vissuto solo come errore da non far vedere al professore.

Mentre la formazione fisico-matematica tradizionale insiste sull'accuratezza e la veridicità quantitativa (modelli il più possibile aderenti alla realtà misurata), problemi come il climate change richiedono anche di abbracciare la complessità e considerare aspetti qualitativi (ad esempio, diverse possibili storie evolutive del sistema climatico in base a come reagisce la società). Non sorprende che i fisici possano inizialmente mostrare resistenza verso approcci narrativi o scenari what if, come le storyline, percependoli forse come meno scientifici perché non esclusivamente basati su equazioni. Tuttavia, proprio agli studenti di fisica spetterà spesso, in futuro, il compito di affrontare problemi globali legati ad esempio a energia e clima, dove bisogna saper unire rigore quantitativo e valutazione di incertezze complesse. È dunque importante che, durante i loro studi, sviluppino una mentalità flessibile riguardo all'incertezza.

5.1 Focus group

L'attività si inserisce nel percorso di lavoro del Special Interest Group 8 (SIG8) della European Science Education Research Association ([ESERA](#)). ESERA è l'associazione europea che riunisce la comunità di ricerca in didattica delle scienze e coordina gruppi tematici (Special Interest Groups) su questioni considerate prioritarie per il rinnovamento dell'educazione scientifica. Il SIG8 è il gruppo che lavora su una Futures-Oriented Science Education, ponendo al centro temi come la verità in epoca di *post-verità*, il rapporto tra fatti e valori, il passaggio dal solo *problem solving* al *problem framing* e, in particolare, la tensione tra certezze e incertezze come chiave per educare ai futuri.

Nel quadro del SIG8 è in corso la stesura di un manifesto ESERA (orizzonte 2027) che formulerà una serie di raccomandazioni per ripensare le priorità educative nella formazione scientifica dei giovani. Una delle priorità individuate (Priority 2) riguarda il re-valutare la tensione tra certezze e incertezze come motore, fondato sulla scienza, per sviluppare competenze critiche e proattive orientate ai futuri, con un'attenzione particolare a sfide come il cambiamento climatico o l'intelligenza artificiale. Il focus group qui organizzato per questa tesi e analizzato in questa sezione fa parte di questo percorso: è una versione di prova del pre-conference workshop realizzato al congresso ESERA 2025 di Copenaghen nell'Agosto 2025, pensata per esplorare le reazioni di giovani adulti a un set di raccomandazioni preliminari su certezze–incertezze. Questo focus group è stato realizzato un mese prima della conferenza, a fine luglio 2025, in modalità virtuale.

Il campione è costituito da cinque partecipanti, giovani adulti che hanno avuto precedenti esperienze nei corsi di didattica della scienza: in particolare, due di loro avevano già preso parte al workshop di Febbraio 2025 organizzato a Bologna sullo stesso tema. La scelta è stata intenzionale ed è stato invitato via e-mail un piccolo gruppo di studenti che potessero portare sia uno sguardo interno (familiarità con il discorso didattico ed epistemologico sulla scienza), sia uno sguardo generazionale, in quanto destinatari diretti delle proposte di educazione ai futuri studenti. I cinque partecipanti sono stati suddivisi in due sottogruppi (un gruppo da due e uno da tre) per le fasi di lavoro in stanze separate.

Gli obiettivi specifici dell'attività erano quattro:

1. Esplorare la rilevanza percepita di tre raccomandazioni preliminari della Priority 2 rispetto a una *Futures-Oriented Climate Change Education*, chiedendo ai partecipanti di attribuire un punteggio da 0 a 3 e di argomentare la propria scelta.
2. Raccogliere criticità e proposte di riformulazione in termini di chiarezza, lessico e contenuto, facendo emergere in particolare le tensioni legate alla

dimensione emotiva (paura/curiosità verso il futuro), all'educazione alla cittadinanza e agli aspetti socio-politici e multiculturali della scienza.

3. Rendere esplicite le dimensioni considerate fondamentali nella tensione certezza–incertezza (personale-emotiva, sociale-politica, multiculturale, legata ai livelli scolari) e il modo in cui tali dimensioni cambiano al variare dei contesti.
4. Produrre una versione rivista delle raccomandazioni, da sottoporre successivamente alla comunità ESERA, che tenesse conto delle riflessioni emerse e articolasse in modo distinto gli obiettivi personali-emotivi, sociali-politici, di mappatura multidimensionale e di differenziazione per livelli scolari.

Per quanto riguarda le modalità di raccolta dati, l'attività si è svolta in un unico incontro sincrono (circa due ore) condotto dalla prof.ssa Levrini, con condivisione di slide contenenti la Priority 2. Dopo l'introduzione al contesto ESERA/SIG8 e alla logica del manifesto, i partecipanti sono stati divisi in sottogruppi. In una prima fase, ogni sottogruppo ha: (i) letto e tradotto le raccomandazioni; (ii) discusso il significato di ciascuna; (iii) attribuito un punteggio da 0 a 3 in termini di rilevanza per la *climate change education*; (iv) scritto brevi giustificazioni raccolte in una slide condivisa. In una seconda fase, dopo un confronto plenario sulle criticità emerse, i gruppi hanno lavorato alla riscrittura delle raccomandazioni, proponendo riorganizzazioni, divisioni in sottopunti e aggiunte. L'intero incontro è stato registrato e trascritto automaticamente, generando un corpus di trascrizioni testuali su cui è stata condotta l'analisi qualitativa.

Infine, per la presentazione dei dati nella tesi, si è scelto di combinare:

- una ricostruzione narrativa delle diverse fasi del focus group e del processo di revisione (fino alla versione delle raccomandazioni proposta da Levrini a partire dai contributi dei due gruppi, con l'introduzione di una quarta raccomandazione sui livelli educativi);
- l'inserimento di estratti discorsivi estesi tratti dalle trascrizioni (riportati in forma quasi integrale), per restituire la ricchezza argomentativa delle posizioni dei partecipanti e rendere trasparente il passaggio dalle loro voci alle categorie interpretative usate nel seguito del capitolo.

Introduzione al lavoro

Nel file di lavoro del workshop la priorità (priority 2 del manifesto SIG8 - ESERA) recita:

“Re-valuing the tension between certainties–uncertainties as a science-based driver for developing conscious, critical and proactive transformative competences of futures for dealing with societal challenges like Climate Changes or Artificial Intelligence. Modernity-framed science education tends to promote students' attitudes oriented to either seek refuge in the illusion of absolute certainty or succumb to the paralysis of pervasive uncertainty. The complexity of the society of acceleration and risk requires science education to re-frame the tension between certainties–uncertainties and change the values ascribed to it as a dynamic, generative and multidimensional driver for Futures-Oriented Science Education.”

Questo preambolo è seguito da tre raccomandazioni che trattano:

- 1) la tensione certezza–incertezza come lente per discutere i futuri;
- 2) la tensione come antidoto a visioni ipersemplificate, utopiche/distopiche;
- 3) la necessità di mappare tale tensione lungo dimensioni concettuali, epistemologiche, cognitive, emotive, identitarie, istituzionali, sociali e politiche, distinguendo anche i diversi contesti (produzione, applicazione, educazione e comunicazione della conoscenza).

Queste raccomandazioni sono state chiamate “*tentative*” proprio perché parte di un processo collaborativo di co-creazione, che sta andando tutt'ora avanti. Le raccomandazioni emerse dal primo workshop del SIG8, tenutosi a febbraio 2025 durante il primo meeting in persona del SIG8, sono le seguenti:

- *Tentative recommendation 1:* "The tension between certainties–uncertainties should be valued in science education as a way to highlight and discuss different perspectives on the future. Certainty is traditionally associated with a predetermined future, providing comfort and security. In contrast, uncertainty offers the possibility of co-creating a view of open futures, though it can also induce discomfort and fear of the unknown. Both have to be shown as coexisting, and how their tension can be navigated depends on the mindset and approaches we are able to form in students."
- *Tentative recommendation 2:* "The tension between certainties–uncertainties should be promoted as a gateway to avoid hyper-simplified and polarised views toward naive utopian or dystopian views of the futures. The tension should be valued to open spaces for imagining a plurality of possible futures and alternative ways to conceptualize the production, application and communication of knowledge."
- *Tentative recommendation 3:* "The transformative character of the tension between certainties–uncertainties should be pursued by valuing its multi-dimensional and multi-cultural character. The values and roles of the tension should be indeed mapped along different dimensions: conceptual, epistemological (foundational), cognitive, emotional, identity, institutional (curricular and teacher education), social and political. The tension should be also mapped considering the socio-economical-political-cultural differences of context and considering the distinction between

contexts of knowledge production, knowledge application, and educational and communication contexts."

Queste tre raccomandazioni racchiudono tre obiettivi rispetto alla dicotomia tra certezza e incertezza.

La prima e la seconda raccomandazione sono pensate per legare certezza e incertezza al futuro e volutamente non sono stati inseriti aspetti di operatività, perché l'idea è di mostrare che la tensione certezza-incertezza e il futuro sono legati da un aspetto emotivo. L'obiettivo è quello di indagare l'aspetto emotivo rispetto alle sensazioni di confort e discomfort, perché all'interno della tensione si possono innescare sensazioni di comfort, di discomfort, di paura, di bisogno di sicurezza, che fanno parte del futuro e possono essere concettualizzati a partire da certezza e incertezza; quindi, trattare bene la tensione può aiutare a raggiungere l'obiettivo di riuscire a gestire emotivamente questi meccanismi (obiettivo emotivo-personale). In particolare, nel secondo punto, si lega la tensione tra certezza e incertezza al futuro perché questo può avere degli impatti sull'obiettivo di educazione alla cittadinanza, cercando di evitare delle polarizzazioni tra utopia naïve e distopia (obiettivo sociale-politico).

Nel terzo punto l'obiettivo è quello di specificare il bisogno di mappare rispetto a tutte le varie dimensioni quando si parla della tensione tra certezza e incertezza (mappatura multi-dimensionale).

- Introduzione al lavoro (10–15'): Sono stati richiamati i quattro assi del manifesto, ossia verità in epoca "post-truth", fatti e valori, ripensamento di problem solving/problem framing, e la tensione tra certezza e incertezza, specificando che nell'attività ci si concentra proprio su quest'ultima tensione vista la sua importanza nell'educazione scientifica. Operativamente, i/le partecipanti sono stati/e suddivisi/e in due sottogruppi (2+3) e invitati/e a leggere ciascuna bozza di raccomandazione, valutarne la rilevanza per una science education future-oriented con uno score 0–3 (il numero è uno spunto per argomentare), discutere e proporre modifiche (termini, enfasi, sotto-raccomandazioni). Si suggerisce di dedicare circa 10 minuti per raccomandazione per garantire chiarezza e rilevanza.
- Task 1 – Analisi delle raccomandazioni (35–40'): i gruppi hanno letto/tradotto le tre sotto-raccomandazioni e assegnato una valutazione con relativa spiegazione.
- Check intermedio (10'): condivisione tra i gruppi attraverso un riscontro su comprensibilità degli stimoli e tipo di ragionamenti emersi.
- Task 2 – Ricerca di miglioramenti (35–40'): i due gruppi hanno lavorato alla riscrittura/ri-organizzazione delle tre raccomandazioni del pacchetto "Certainties–Uncertainties", cercando di chiarire il lessico, decidere se unire o spezzare punti, e definire un ordine logico adatto ai diversi livelli educativi.
- Check finale (15'): Nel confronto conclusivo, i gruppi hanno chiarito quanto fatto nel Task 2 e cosa rimane da sistemare. A partire da queste indicazioni, è

stata costruita una sintesi del lavoro svolto.

Nelle sezioni seguenti descrivo in dettaglio lo svolgimento dei task, 1 (5.1.1) e 2 (5.1.4), assieme alla trascrizione di alcuni interventi ritenuti rilevanti per la descrizione del pensiero emerso rispetto alle raccomandazioni (5.1.3). Commento e analisi di queste attività sono riportate rispettivamente nelle sottosezioni 5.1.2 e 5.1.5.

5.1.1 Task 1

E' stato chiesto ai/alle partecipanti di leggere le tre raccomandazioni, discuterne la chiarezza e assegnare un punteggio 0–3 rispetto alla rilevanza per una formazione orientata al futuro (è stato richiesto inoltre che ogni risposta fosse motivata e argomentata):

- 0 = Non rilevante per un'educazione orientata al futuro sul cambiamento climatico;
- 1 = Moderatamente rilevante per un'educazione orientata al futuro sul cambiamento;
- 2 = Rilevante per un'educazione orientata al futuro sul cambiamento;
- 3 = Altamente rilevante per un'educazione orientata al futuro sul cambiamento.

Verranno di seguito riportati alcuni stralci delle discussioni interne ai gruppi, partendo dal primo e continuando con il secondo, per concludere poi con una sintesi delle considerazioni prodotte.

Gruppo 1

Nel gruppo 1 erano presenti gli studenti D e M, dei quali verranno riportate alcune considerazioni sulle tre raccomandazioni, partendo dalla prima. Il gruppo ha sin da subito evidenziato una difficoltà nel gestire la raccomandazione 1, ritenuta eccessivamente vaga:

D: "Sono frasi talmente larghe che è difficile dire qualcosa... il pubblico a cui ti rivolgi è molto importante."

In particolare, si cerca di capire per quale livello di istruzione è pensata:

D: "Stiamo parlando di qualsiasi livello di educazione scientifica? Stiamo parlando di partire dalle elementari con una cosa del genere, o stiamo parlando di gente che comunque ha già un minimo di formazione, quindi stiamo parlando per esempio di un corso universitario?"

E ancora D:

D: "Non è troppo utile, nei primi livelli, parlare di scienza in questo modo senza sapere come funziona la struttura della ricerca e come interpretare i dati. [...] Il senso

è che se io ti vado a spiegare tutta la questione della certezza o incertezza della scienza e per te la scienza è il vecchio che mescola le provette e fa i colori, non stiamo parlando delle stesse cose, ma stiamo parlando di due pianeti diversi, ecco. ”

In questi passaggi, D. esprime fin da subito una forte perplessità verso la formulazione della prima raccomandazione, giudicata troppo generica e “alta” rispetto alle concrete possibilità dei diversi livelli scolastici: non si può parlare di certezza e incertezza della scienza “a ogni livello” se, per molti bambini, la scienza è ancora l’immagine stereotipata del “vecchio che mescola le provette”. Serve prima costruire un’idea minima condivisa di che cosa sia il sapere scientifico.

M., pur riconoscendo questo limite, insiste sul fatto che già dalla scuola primaria sia importante scardinare l’equivalenza “scienza = certezza”, proponendo invece un’immagine in cui certezze e incertezze coesistono, senza che l’incertezza faccia perdere alla scienza il suo valore di verità. Su questa base, i due convergono sull’idea che il prerequisito per affrontare in modo sensato la tensione certezza–incertezza sia un’educazione, fin da piccoli, alla comprensione e alla lettura dei dati: non solo capire che cosa dice un risultato scientifico, ma imparare a contestualizzarlo, confrontarlo con altre evidenze e valutarne l’attendibilità. È questa esigenza di costruire prima literacy sui dati e capacità di lettura critica, e solo dopo innestarvi la riflessione meta-epistemologica su certezze e incertezze, che orienta la scrittura delle note di valutazione del gruppo 1.

“Educare fino ai primi livelli alla lettura critica del dato scientifico, non con pretesa di verità, ma per educare alla comprensione dei risultati prodotti dalla scienza e dalla ricerca.”

Per quanto riguarda le raccomandazioni 2 e 3, il gruppo le giudica complessivamente più chiare e operative rispetto alla prima. D sottolinea che la seconda “è educazione alla lettura critica”, perché invita a far motivare agli studenti i propri giudizi esplicitando le ragioni del punteggio dato, e quindi le basi argomentative delle loro valutazioni. Anche la terza viene valutata come *high relevant* in quanto collega la tensione tra certezza e incertezza alle prospettive sul futuro e ai diversi contesti in cui gli studenti sono inseriti. Le osservazioni si concentrano soprattutto sulla forma: si propongono frasi più brevi, la rimozione di incisi che appesantiscono la lettura e una maggiore chiarezza nel collocare le raccomandazioni nei livelli di istruzione più appropriati (higher science education) e nei diversi contesti socio-economico-politico-culturali. In questo senso, le note di valutazione non mettono in discussione il contenuto delle raccomandazioni 2 e 3, ma mirano a renderle più leggibili e a esplicitare meglio la loro funzione di traduzione didattica della tensione tra certezza e incertezza.

Qui di seguito sono riportate le tre valutazioni date dal gruppo 1:

1. "Score 1/2 [2 in contesto già educato, 1 in contesto di pre-formazione] - Frase troppo "larga" (broad), da contestualizzare su più livelli (elementari vs università). Non è troppo utile, nei primi livelli di educazione, parlare di scienza in questo modo senza sapere come funziona la struttura della ricerca scientifica, e come interpretare i dati che la scienza ci dà. A livello universitario può essere molto più produttivo, purché ben inquadrato."
2. "Score 3 - È educazione all'interpretazione del mondo e alla lettura critica. Applicabile a qualsiasi livello in quanto permette posizionamento consapevole."
3. "Score 3 - Riassume le nostre critiche al punto 1: affrontare l'argomento in base al contesto in cui ci si trova, e con le precauzioni dovute a differenti livelli di educazione. Importante costruire una base solida prima di portare in alto la torre."

Gruppo 2

Il gruppo 2, formato da tre persone, B,C e J, ha fatto un ragionamento esteso alla scienza in generale e non solo al cambiamento climatico, facendo venir fuori considerazioni interessanti sulla tensione tra certezza e incertezza e sul rapporto delle nuove generazioni con questa tensione.

Questo tipo di ragionamenti è visibile, per esempio, nella discussione sulla prima raccomandazione, in cui B e C intrattengono uno scambio interessante rispetto alla rilevanza emotiva, soprattutto nei giovani:

B: "La paura e questo senso di perdizione verso il futuro è una cosa che c'è nella nostra generazione, ma forse anche nelle generazioni più giovani, e causa tante ansie che non sono effettivamente supportate da dei dati."

C: "Si è visto quanto è diventata grande questo tipo di ansia dopo il Covid, che lì c'è stata tanta incertezza totale assoluta, perché uno si è trovato davanti al non avere idea di come affrontare una cosa del genere, vedendo tutte le proprie certezze che si sgretolavano. E lì, proprio anche a livello di dati, le patologie psicologiche, soprattutto nei giovani, sono aumentate tantissimo."

Da questo scambio emerge chiaramente come, per il gruppo, la tensione tra certezza e incertezza non sia solo un fatto cognitivo, ma abbia una forte dimensione emotiva e generazionale. B mette in luce il fatto che molte ansie riguardo al futuro non sono effettivamente supportate dai dati, ma si alimentano in un clima di incertezza diffusa. C collega esplicitamente questo clima all'esperienza del Covid-19, presentata come esempio emblematico di "incertezza totale assoluta", in cui le certezze quotidiane si sono sgretolate e si è osservato un aumento delle fragilità psicologiche nei giovani. In altre parole, i partecipanti riconoscono che l'incertezza scientifica, quando non è mediata e contestualizzata, può tradursi facilmente in percezioni di minaccia e in paura generalizzata, suggerendo implicitamente che

un'educazione alla tensione tra certezza e incertezza debba includere anche il lavoro sulle dimensioni emotive e sul rapporto tra dati, narrazioni e percezioni del rischio.

Un altro aspetto interessante viene fuori dalle parole di J che, come poi riassume anche nella valutazione alla raccomandazione, cerca di capire come si può sviluppare l'approccio scientifico all'interno di questa dicotomia tra certezza e incertezza:

J: "Posta in qualche modo la dicotomia certezza-incertezza e il fatto che queste coesistano, quale può essere un'immagine per rappresentare un po' il loro rapporto? [...] Mi chiedo: in che rapporto si può sviluppare questa tensione certezza-incertezza?"

E ancora J:

J: "Visto che un approccio scientifico è comunque un approccio che prova a gestire l'incertezza e a orientarsi in qualche modo nell'incertezza, come lo visualizziamo in questo binomio, laddove non possiamo immaginarlo come semplice certezza nell'incertezza (perché non è così), ma neanche come incertezza totale e quindi, appunto, tutto aleatorio, tutto casuale?"

In questo frangente J esplicita in modo molto lucido una domanda di fondo che attraversa tutto il focus group: se certezza e incertezza coesistono e nessuna delle due può essere eliminata, dove si colloca allora l'approccio scientifico? Le sue parole mostrano il tentativo di pensare la scienza non come isola di certezza né come immersione in un'incertezza totale, ma come pratica di orientamento dentro l'incertezza, che richiederebbe anche un'immagine o una metafora condivisa per essere comunicata efficacemente.

Successivamente, durante la lettura della seconda raccomandazione, il gruppo nota come questa sia una prosecuzione naturale della prima: se la prima riguarda il modo in cui si introduce la tensione certezza-incertezza, la seconda viene interpretata come il luogo in cui questa tensione si gioca concretamente nel rapporto tra informazioni autonome (social, fonti non istituzionali) e informazioni mediate dalla scuola.

B: "Qua secondo me si riapre un po' il tema social-scuola come prima: è un'informazione che tendenzialmente deriva dai social o comunque da fonti autonome, diciamo. Se invece venisse da una forma più istituzionalizzata o comunque ufficiale, forse creerebbe anche una visione più completa e più coerente, quindi più informata anche se non per forza meno preoccupante."

E ancora:

C: "Veramente penso che siano importanti allo stesso modo almeno queste due raccomandazioni perché sono una declinazione diversa dello stesso problema, nel senso che le riflessioni che mi verrebbero da fare sono molto simili: per me la questione della visione del futuro rientra perfettamente anche nella gestione dell'ansia e in come i social ti presentano le cose."

Per il gruppo, dunque, lavorare sull'approccio scientifico significa anche aiutare gli studenti a gestire l'ansia e le visioni del futuro alimentate dai social, offrendo canali istituzionali che rendano questa tensione più pensabile e meno schiacciante.

Altre interessanti considerazioni sono ben riassunte nei loro punti chiave inseriti nella valutazione delle raccomandazioni, che riporto qui di seguito:

1. SCORE 3 - L'incertezza genera soprattutto nella nostra generazione e in quelle più giovani degli stati di ansia spesso "ingiustificata". Ad esempio, un grande momento di incertezza c'è stato con il covid, dopo il quale sono aumentati tantissimo i casi di malessere psicologico soprattutto nella nostra fascia di età. Questi sono temi che ai giovani interessano molto ma che vengono trattati più sui social in maniera superficiale che a scuola in modo strutturato. Per strutturarlo, c'è da capire che immagine del rapporto tra certezza e incertezza vogliamo creare.
2. SCORE 3 - Costruire una prospettiva complessa è importante come formazione di una cittadinanza più consapevole per non essere vittime di propaganda. Un altro punto è la visione di tensione e continuum anche tra utopie e distopie, rispetto alle quali la complessità e la tensione tra incertezza e certezza possono aiutare a collocarsi e a non polarizzare e non semplificare, considerando anche che il presente ha i tratti di utopie e distopie del passato.
3. SCORE 3 - Pieno, difficile da leggere ma presenta elementi necessari da dire. In particolare, è fondamentale il carattere contestuale e sociale della scienza stessa, che può aiutare a superare una prospettiva eurocentrica.

5.1.2 Commento e discussione del TASK 1

In questa prima richiesta spicca la valutazione diversa che i due gruppi propongono per la prima raccomandazione, di moderata rilevanza per il gruppo 1 e di alta rilevanza per il gruppo 2.

Le valutazioni divergenti indicano due bisogni complementari. Da un lato, serve gradualità: la prima raccomandazione è percepita dal Gruppo 1 come troppo ampia e va contestualizzata per livelli, perché senza basi su metodo scientifico e lettura dei dati rischia di essere poco utile nei gradi iniziali di istruzione, mentre diventa fruttuosa all'università se ben incorniciata. Dall'altro lato, il Gruppo 2 richiama un'urgenza generazionale: l'incertezza è vissuta come ansia (amplificata dal Covid) e viene trattata più sui social che a scuola.

In sintesi, potrebbe essere utile fondare prima l'alfabetizzazione a dati e metodo, insieme a un lavoro esplicito sulle emozioni, per poi usare la tensione certezza- incertezza come strumento critico, così da rispondere alla domanda guida: "che immagine vogliamo costruire di questo rapporto?"

Per la seconda e la terza raccomandazione, entrambi i gruppi si trovano in accordo su un'alta rilevanza per un'educazione orientata al futuro.

In particolare, per la seconda raccomandazione emerge una visione condivisa, per cui educare all'incertezza significa formare alla lettura critica del mondo e all'interpretazione consapevole dei messaggi, come base di una cittadinanza attiva capace di non farsi trascinare dalla propaganda. Non è una competenza specialistica, ma trasversale e scalabile che può essere coltivata a tutti i livelli di istruzione e in contesti diversi. Il cuore sta nell'abitare la complessità, cioè nell'imparare a riconoscere la tensione tra certezza e incertezza non come un aut-out, ma come un continuum che consente di posizionarsi senza cadere in semplificazioni o polarizzazioni. In questa prospettiva, anche le immagini di utopia e distopia non sono etichette opposte e fisse, ma coordinate con cui orientarsi: la realtà presente porta tracce di utopie/distopie passate, e saperle leggere aiuta a riconfigurare gli elementi narrativi con cui comprendiamo i problemi e agiamo nel mondo.

L'educazione all'incertezza, dunque, non solo rafforza gli anticorpi informativi contro retoriche manipolatorie, ma offre strumenti per riformulare continuamente il proprio sguardo, aggiornando criteri e significati alla luce di contesti e prove. Secondo i due gruppi, quindi, la seconda raccomandazione rispecchia una pedagogia della complessità che unisce interpretazione critica, responsabilità civica e capacità di riposizionamento riflessivo.

Per quanto riguarda la terza raccomandazione, entrambi i gruppi chiedono che l'argomento venga affrontato in modo situato, calibrando linguaggio, esempi e obiettivi al contesto e al livello formativo dei destinatari: per il gruppo 1 ritorna il bisogno di costruire prima fondamenta solide, per "alzare la torre" successivamente con concetti più avanzati. Al tempo stesso, il gruppo 2 riconosce che alcuni passaggi, pur densi e faticosi da leggere, contengono ciò che è necessario dire: la soluzione non è semplificare al ribasso, ma migliorarne la leggibilità senza perderne la sostanza. Inoltre, il secondo gruppo sottolinea il carattere sociale e contestuale della scienza: ciò implica presentarla come pratica situata, non neutra né universale per default, e decentrarne lo sguardo, superando una prospettiva eurocentrica a favore di prospettive plurali.

In sintesi, secondo i due gruppi, il trattamento graduale e contestualizzato, il rigore senza opacità e l'apertura culturale sono le condizioni per un'educazione all'incertezza efficace.

5.1.3 Check intermedio

Alla fine della prima task c'è stato un confronto tra i gruppi moderato principalmente dalla prof.ssa Levrini.

In questo momento di condivisione, il Gruppo 1 ha segnalato un lessico pesante e specialistico che ostacola l'avvio della lettura e della successiva comprensione. Superato l'ostacolo, il gruppo individua nella prima raccomandazione il nodo principale: troppo larga e poco operativa senza esplicitare delle basi pregresse su cos'è un sapere scientifico e su come si legge un dato. Per questo motivo il gruppo 1 ha proposto di invertire l'ordine con la terza raccomandazione e di considerare la riflessione su certezza–incertezza come passaggio meta-epistemologico da attivare dopo alfabetizzazione al dato e al pensiero critico, attraverso un'analogia molto forte:

“Ai livelli bassi di educazione non si sa ancora bene come è strutturato il sapere scientifico, inoltre non si sa ancora bene cosa si intenda per certezza o incertezza... è come mettere qualcuno in macchina senza patente”.

Il Gruppo 2 invece, nonostante una palese difficoltà nel dover gestire dei tempi stretti, ha riferito una comprensione generalmente buona, eccetto per la terza raccomandazione, percepita come densa e disorientante. A questo proposito il gruppo ha riferito di vedere delle sovrapposizioni fra la prima e la seconda, proponendo quindi una possibile unione delle due raccomandazioni, valorizzando la trattazione scolastica dell'incertezza per trasformare ansia e polarizzazioni (anche post-Covid/social). In generale la richiesta del gruppo 2 si basa sulla possibilità di inserire metafore e/o immagini alternative alla semplice tensione bipolare, per rendere un approccio science-based che, pur confrontandosi con l'incertezza, cerca regolarità e strumenti di orientamento.

A seguito della condivisione dei due gruppi, la prof.ssa Levrini ha chiarito come la terza raccomandazione fosse un invito alla contestualizzazione e alla mappatura, e ha sollecitato i due gruppi ad una riscrittura (anche riorganizzando l'ordine) che migliorasse la leggibilità e mantenesse allo stesso tempo un'ambiguità generativa.

5.1.4 Task 2

La seconda richiesta consiste nel riscrivere o riformulare le raccomandazioni, con la possibilità di introdurre sia esempi che aggiustamenti di linguaggio. Anche in questo caso vengono riportate alcune frasi estratte dalle discussioni interne ai gruppi.

Gruppo 1

Alla luce delle considerazioni avanzate nel Task 1, il gruppo 1 ha proposto di:

- cambiare ordine alla Tentative recommendation 3, spostandola come “punto 1” per il suo ruolo di mappatura multi-dimensionale e multi-contesto come cornice di partenza;
- lasciare la raccomandazione sull’evitare ipersemplificazioni e polarizzazioni come seconda;
- riordinare come terza la raccomandazione sull’uso della tensione per aprire ai futuri come applicazione.

Inoltre, dopo il confronto effettuato con l’altro gruppo durante il Check intermedio, anche nel Gruppo 1 nasce l’esigenza di cercare un’immagine che rappresenti la tensione certezza–incertezza, come si evince dal seguente contributo:

M: “Bisogna capire come possiamo vedere a livello anche metaforico e a livello simbolico questa tensione. [...] La vediamo come una molla? La vediamo come un ingranaggio? Fisicamente, la vediamo come cosa? Come percepiamo la tensione e come la nostra visione di scienza viene modificata da questa tensione? Ovviamente non deve essere la stessa per tutti, cioè ognuno la può vedere diversamente.”

M propone esplicitamente di lavorare sul piano metaforico e simbolico, chiedendosi che tipo di oggetto possa incarnare questa tensione. In questa prospettiva, la scelta dell’immagine non è neutra, ma rende visibile come ciascuno percepisce la tensione e come questa percezione modifica la propria visione di scienza, aprendo alla possibilità che coesistano rappresentazioni diverse e legittime.

Alla luce di queste considerazioni, il Gruppo 1, ha deciso di cambiare le tre raccomandazioni in questo modo:

1. *Tentative recommendation 1:* The transformative character of the tension between certainties–uncertainties should be pursued by valuing its multi-dimensional and multi-cultural character. The values and roles of the tension should be indeed mapped along different dimensions: conceptual, epistemological (foundational), cognitive, emotional, identity, institutional (curricular and teacher education), social and political. The tension should be also mapped considering the socio-economical-political-cultural differences of context and considering the distinction between contexts of knowledge production, knowledge application, and educational and communication contexts.
2. *Tentative recommendation 2:* The tension between certainties–uncertainties should be promoted as a gateway to avoid hyper-simplified and polarised views toward naive utopian or dystopian views of the futures. The tension should be valued to open spaces for imagining a plurality of possible futures and alternative ways to conceptualize the production, application and communication of knowledge.
3. *Tentative recommendation 3:* The tension between certainties–uncertainties should be valued in science education as a way to highlight and discuss different perspectives on the future. Certainty is traditionally associated with a predetermined future, providing comfort and security. In contrast, uncertainty offers the possibility of co-creating a view of open futures, though it can also induce discomfort and fear of

the unknown. Both have to be shown as coexisting after providing solid bases for understanding the meaning of certainty and uncertainty in science. How this tension can be navigated depends on each level of education:

- In lower levels of education the tension might be used as a training ground to recognize flawed definitions and interpretations of certainty, uncertainty and scientific truth. It is also important to introduce critical thinking skills and how to read and interpret data.
- In higher levels of education facing this tension might be a catalyst to promote self positioning in the way science is produced, distributed, and communicated, as well as the desired futures and outcomes.

Quello che si vede in questa nuova redistribuzione è che il Gruppo 1 non sta più solo elencando contesti in cui la tensione certezza–incertezza è rilevante, ma prova a concettualizzarla come struttura trasformativa che attraversa dimensioni diverse e che può orientare sia la ricerca che l'educazione:

- La prima raccomandazione esplicita che la tensione certezza–incertezza è un motore che va valorizzato nelle sue molte dimensioni: non esiste una sola tensione astratta, ma molte tensioni situate, che vanno mappate e rese visibili;
- Nella seconda raccomandazione il gruppo afferma che insistere solo sulla certezza (o solo sull'incertezza) favorisce visioni iper-semplificate e polarizzate, con futuri ingenui, o troppo utopici o troppo distopici. Invece, lavorare sulla tensione apre uno spazio per immaginare una pluralità di futuri, per rimettere in discussione come pensiamo la produzione, l'applicazione e la comunicazione della conoscenza.
- La terza raccomandazione traduce queste idee in termini didattici: in educazione scientifica la tensione certezza–incertezza viene proposta come occasione per discutere esplicitamente che cosa intendiamo per certezza, incertezza e verità scientifica, e per confrontare visioni diverse del futuro. Nei livelli scolastici più bassi, la tensione è pensata come palestra in cui imparare a riconoscere definizioni sbagliate o ingenue, imparare a leggere dati e sviluppare pensiero critico di base; nei livelli più alti, la tensione diventa un catalizzatore per l'auto-posizionamento: come mi colloco rispetto ai modi in cui la scienza è prodotta, distribuita, comunicata? Quali futuri desidero, e che ruolo attribuisco alla conoscenza scientifica in questi futuri?

Da qui emergono 4 messaggi chiave:

1. La tensione certezza–incertezza non è un difetto da correggere.
2. Questa tensione è multidimensionale e multiculturale, e va esplicitamente mappata lungo dimensioni epistemiche, emotive, identitarie, istituzionali e socio-politiche, in contesti diversi.
3. La tensione diventa una porta d'accesso per pensare in modo meno binario e più articolato il rapporto tra scienza e futuro.

4. In educazione scientifica, la tensione certezza–incertezza può diventare un tema ricorrente che attraversa i diversi livelli scolastici, assumendo forme diverse ma mantenendo una continuità.

Gruppo 2

Il gruppo 2, a seguito di una conversazione volta principalmente al confronto e meno alla riscrittura, si è concentrata sulla costruzione di proposte di modifica per le raccomandazioni. Innanzitutto, ha proposto di unire le prime due raccomandazioni in un'unica raccomandazione, a seguito della già commentata in precedenza sovrapposizione tra le due. In particolare, ragionando sulla prima, come esposto nei contributi riportati di seguito, il gruppo elabora un pensiero che si lega a degli aspetti profondi di emozioni epistemiche: l'idea che la certezza dia comfort è situata e, in realtà, può anche generare ansia. A riprova di questo si riporta uno scambio intero tra tutti i componenti del gruppo:

J: "Ora stavo leggendo sul primo 'Certainty is traditionally associated with a predetermined future, providing comfort and security', cioè la certezza da comfort e sicurezza. Secondo me questo non è vero in qualsiasi prospettiva, se lo guardiamo alla luce del terzo. È vero nella prospettiva dell'Occidente che ha ancora una certa fede nel progresso."

B: "Secondo me è anche parziale, cioè nel senso che comunque una certezza di futuro può anche dare un'ansia terribile di tutto, già stabilito e già segnato."

J: "Esatto, in qualche modo anche la visione di futuro pessimistica per cui non si può fare niente per cambiare le cose e quindi non si fa niente e quindi tutto andrà per il peggio è una visione di certezza, ma non per questo fornisce comfort."

C: "E la stessa cosa al contrario, perché come l'incertezza mi può far paura, in realtà mi può anche far dire 'dai magari può andare bene'."

B: "E che poi è quello che penso si voglia stimolare, cioè vedere l'incertezza come una possibilità, visto che si parla proprio di futuri aperti."

Questo scambio mette in luce come il Gruppo 2 utilizzi il Task 2 per problematizzare una delle assunzioni implicite presenti nelle raccomandazioni, ossia l'idea che la certezza sia automaticamente associata a comfort e sicurezza, mentre l'incertezza produca soltanto paura. I partecipanti mostrano invece che entrambe le polarità sono cariche di emozioni epistemiche ambivalenti: una certezza a futuro chiuso può generare angoscia e senso di impotenza, mentre l'incertezza, pur spaventando, può aprire uno spazio di possibilità. In questo senso, ciò che conta non è solo il contenuto cognitivo delle affermazioni, ma il modo in cui queste configurazioni di futuro vengono vissute affettivamente dai soggetti. Il lavoro di revisione delle raccomandazioni va dunque in direzione di una cornice che valorizza l'incertezza non solo come dato epistemico, ma anche come risorsa che può innescare un

cambiamento nel modo in cui pensiamo, sentiamo e agiamo per immaginare alternative e sostenere agency, spostando l'attenzione dall'opposizione secca certezza/incertezza alla qualità dei futuri che esse rendono pensabili.

Invece, per quanto riguarda la terza raccomandazione, la proposta del gruppo è stata quella di suddividerla in sotto-punti più chiari. Una possibilità è quella della divisione in tre sotto-punti differenti, come si evince dal seguente contributo:

B: "Leggendo ho pensato che andrebbe proprio divisa. Ci sono le dimensioni concettuali, epistemologiche, cognitive, emozionale, identitarie, istituzionale, sociale e politica. È tutto un grande calderone, magari dividerlo un po' può aiutare la lettura. Dividere magari in concettuale, epistemologica e cognitiva in una sottosezione; emozionale, identitaria in un'altra; istituzionale, sociale, politica in un'altra ancora. E magari non proprio spiegare, però fare una frasetta per ogni dimensione."

Inoltre, nel gruppo si è discusso di come riscrivere queste frasi in maniera più leggibile. Questa discussione di alcuni minuti, che non verrà riportata qui per intero, è confluita in una sintesi scritta sul foglio di lavoro:

"Tenere conto del ruolo della tensione nelle tre dimensioni e di come i contesti concreti giochino un ruolo in tutte le tre dimensioni. Si può dividere in contesti legati alla conoscenza (produzione, applicazione, comunicazione, ...) e contesti sociali e culturali."

Finite le rispettive discussioni, c'è stato un nuovo confronto tra i gruppi, con la presenza mia, della prof.ssa Levrini e del dottor Miani con il fine di giungere ad una sintesi del lavoro svolto.

5.1.5 Commento e discussione del Task 2

Nel Task 2 gli studenti non erano più chiamati soltanto a giudicare le raccomandazioni, ma a metterci le mani dentro: riscriverle, riorganizzarle, decidere cosa tenere, cosa spostare, cosa rendere esplicito. Questo passaggio dalla valutazione alla co-scrittura rende il Task 2 particolarmente interessante perché trasforma le raccomandazioni da oggetto esterno di analisi a spazio di negoziazione, in cui emergono in modo molto chiaro i criteri che per gli studenti devono guidare una futura pedagogia della tensione certezza–incertezza.

Un primo asse riguarda la questione della struttura e della progressione educativa. Il Gruppo 1 insiste con forza sull'idea che parlare in modo serio di certezza e incertezza richieda prima un lavoro di alfabetizzazione epistemica: "è importante costruire una base solida prima di portare in alto la torre", scrivono, sottolineando che senza una comprensione preliminare di cosa sia un dato scientifico e di cosa si intenda per sapere scientifico e ricerca, il discorso sulla tensione certezza–

incertezza rischia di appoggiarsi ai preconcetti spontanei degli studenti piuttosto che problematizzarli. Da qui la proposta di articolare diversamente le raccomandazioni, distinguendo tra livelli di istruzione e suggerendo di usare la tensione in modo diverso alla scuola primaria/secondaria e all'università: nei primi gradi come allenamento a riconoscere definizioni fallaci di verità scientifica e a leggere i dati, nei gradi più alti come terreno per un posizionamento meta-riflessivo rispetto a come la scienza viene prodotta, distribuita e comunicata.

Un secondo asse riguarda la dimensione emotiva e generazionale della tensione certezza–incertezza, che il Gruppo 2 pone sistematicamente al centro. Fin dalla valutazione iniziale della raccomandazione 2.1, essi legano l'incertezza a stati di ansia che percepiscono come caratteristici della propria generazione: l'esempio della pandemia di Covid-19 ritorna come momento di "incertezza totale" in cui le certezze quotidiane si sono sgretolate e i disturbi psicologici tra i giovani sono aumentati in modo evidente. Allo stesso tempo, gli studenti mettono in luce il ruolo dei social media come luogo in cui questi temi circolano in forme ipersemplificate e allarmistiche, producendo una "ansia non sempre giustificata", perché sganciata da un quadro di dati e da una mediazione istituzionale. È in questo contesto che nasce la domanda, formulata da J e ripresa nel check finale: "che immagine del rapporto tra certezza e incertezza vogliamo creare?". Nel Task 2 questa domanda si traduce in un vincolo di riscrittura: la tensione non deve essere definita solo concettualmente, ma anche come esperienza emotiva (tra paura e curiosità) che la scuola può aiutare a rielaborare in modo non paralizzante.

Le proposte di modifica del Gruppo 2 insistono anche sul legame tra tensione certezza–incertezza e formazione alla cittadinanza. Nel commentare la raccomandazione 2.2, il gruppo mette in guardia rispetto al rischio di visioni polarizzate del futuro – utopiche o distopiche – che possono essere facilmente utilizzate come strumento di propaganda politica, soprattutto se il pubblico non è allenato a riconoscere la complessità dei problemi. In questo senso, la tensione diventa per loro una lente per non farsi trascinare da narrazioni semplicistiche, ma anche per collocarsi criticamente rispetto a discorsi che oscillano fra catastrofismo e negazione del problema. La richiesta implicita è che le raccomandazioni rendano esplicito questo nesso tra lavoro sulla tensione e costruzione di una cittadinanza capace di leggere la complessità, riconoscere gli usi strumentali dell'incertezza e orientarsi in scenari informativi conflittuali.

Un terzo elemento emerso nel Task 2 riguarda la *tentative recommendation 3* originaria, per la quale entrambi i gruppi ne riconoscono la forza ma ne criticano la forma: troppo lunga, troppo densa, con elenchi di dimensioni difficili da abitare sia per chi legge sia per chi dovrà usarla in contesti educativi reali. Da qui la proposta di spezzare l'elenco delle dimensioni in blocchi più gestibili (concettuale/epistemico/cognitivo; emotivo/identitario; istituzionale/sociale/politico) e

di distinguere anche tra contesti diversi (produzione, applicazione e comunicazione della conoscenza; contesti sociali e culturali).

Un quarto elemento, che emerge principalmente dalla discussione interna al gruppo 2, riguarda la contestualità e la dimensione multiculturale. Infatti, il gruppo problematizza il carattere implicito di alcune affermazioni – ad esempio l’idea che la certezza sia tradizionalmente associata a comfort e sicurezza – chiedendosi se tali associazioni siano realmente universali o piuttosto situate in specifiche culture e storie. In questo modo, la dimensione multiculturale non viene percepita come un’aggiunta decorativa, ma come una richiesta di coerenza: se la priorità rivendica il carattere multi-dimensionale e multi-culturale della tensione, allora le raccomandazioni non possono presupporre un vissuto emozionale unico e occidentale.

In sintesi, il Task 2 mostra come gli studenti, messi nella posizione di co-autori del testo, articolino tre richieste forti al manifesto:

1. che le raccomandazioni siano leggibili senza rinunciare a una ambiguità generativa;
2. che riconoscano la dimensione emotiva e generazionale della tensione certezza–incertezza, soprattutto nel contesto di crisi come il Covid-19 e il cambiamento climatico;
3. che siano coerentemente contestualizzate, sia in termini di livelli educativi sia di diversità socio-culturale.

In questo senso, la fase di riscrittura non è un semplice esercizio linguistico, ma un laboratorio in cui l’idea di tensione certezza–incertezza viene messa alla prova come vero oggetto ponte tra scienza, educazione e cittadinanza: un oggetto che deve poter parlare al tempo stesso il linguaggio dei modelli, quello dei vissuti emotivi e quello delle pratiche democratiche.

5.1.6 Check finale

Nel confronto conclusivo, i gruppi hanno chiarito le loro posizioni:

Il Gruppo 1 ha spiegato innanzitutto la scelta della divisione tra i livelli più bassi di educazione e quelli più alti:

M: "Abbiamo cercato di definire gli approcci nei lower levels of education e negli higher levels of education [...]. Il problema principale è che inizialmente non si ha bene idea di che cosa sia la certezza e cosa sia l’incertezza, quindi è importante affrontare anche quelli che potrebbero essere dei preconcetti. Una volta che si è sviluppato il pensiero critico e si conoscono bene i concetti, si può andare ad applicarli alla conoscenza scientifica."

Inoltre, è stata chiarita la scelta di invertire l'ordine delle raccomandazioni:

D: "Abbiamo cambiato l'ordine invertendo prima e terza raccomandazione, perché in questo modo [...] la prima, generale, dice che è un argomento molto delicato e va considerato molto molto esplicitamente in base al contesto, con tanta attenzione. La seconda dà un obiettivo, mentre la terza dà un metro di applicazione (operatività)."

Il Gruppo 2, invece, ha principalmente esposto la preoccupazione riguardo l'assunzione "certezza = comfort e incertezza = discomfort", osservando che è culturalmente situata e non universale.

Successivamente, la prof.ssa Levrini ha sintetizzato ciò che era emerso secondo lei dal focus group, dando una spiegazione di quelle erano inizialmente le tre *tentative recommendation*. Successivamente, riprendendo gli obiettivi iniziali, sono stati delineati nuovi obiettivi, e le riscritture prodotte nei gruppi sono state poi rielaborate nella versione di sintesi proposta da Levrini, esplorando come le istanze emerse nel Task 2 abbiano trasformato la struttura complessiva della priorità 2.

5.2 Nuovi obiettivi e raccomandazioni

Come detto poc'anzi, la priorità "Certainties–Uncertainties" è stata riformulata in quattro obiettivi complementari, con confini più chiari e una logica didattica esplicita. In primo luogo, è stato disaccoppiato ciò che nelle bozze originarie risultava sovrapposto (prima e seconda raccomandazione), chiarendo che un obiettivo riguarda la sfera personale-emotiva e un altro la sfera sociale-politica; in secondo luogo, si è richiesto di rendere operativa la mappatura multidimensionale e multiculturale; infine, si è aggiunta una progressione per livelli educativi, per evitare astrazioni non spendibili in classe.

- **Obiettivo 1 – Personale-emotivo:** La tensione tra certezza e incertezza va trattata anzitutto come nodo formativo affettivo: riconoscere comfort/discomfort, paura e bisogno di sicurezza che la tensione innesca quando si ragiona di futuri. L'idea didattica è che "stare nella tensione" con strumenti concettuali riduca ansia e paralisi, facilitando un rapporto più maturo con il futuro (specie dopo esperienze generazionali come il Covid-19). In termini operativi: attività di riflessione guidata, lessico delle emozioni, narrazioni/metafore per rendere visibile la tensione senza banalizzarla. Ciò giustifica una trattazione non applicativa in questo punto (niente esempi tecnico-disciplinari), ma focalizzata sulla educazione emotiva alla complessità.

- **Obiettivo 2 – Sociale-politico (anti-polarizzazione):** La tensione va promossa come porta d'ingresso per evitare visioni iper semplificate o polarizzate (utopia/distopia) e per allenare cittadinanza critica. La ragione didattica è duplice: mostrare che tra certezze e incertezze esiste un continuum di posizioni informate, e offrire strumenti per riconoscere retoriche e propaganda, anche nei social. Qui l'educazione alla cittadinanza scientifica si allinea con le evidenze su polarizzazione e camere d'eco nei flussi informativi su clima: lavorare sulla tensione aiuta gli studenti a posizionarsi in modo riflessivo rispetto ai messaggi pubblici.
- **Obiettivo 3 – Mappatura multidimensionale e multiculturale:** La tensione deve essere mappata lungo dimensioni distinte (concettuale, epistemologica e cognitiva; emotiva e identitaria; istituzionale, sociale e politica) e in contesti differenziati, riconoscendo anche le differenze culturali. La ragione didattica è la trasparenza del quadro: spacchettare le dimensioni evita il “mappazzone”, consente micro-obiettivi valutabili e rende esplicite le premesse culturali (ad es., l'idea che “certezza = comfort” è situata e non universale).
- **Obiettivo 4 - Progressione per livelli educativi:** La navigazione della tensione dipende dal grado scolastico: nei livelli iniziali si lavora su basi concettuali (che cosa intendiamo per certezza, incertezza e verità scientifica) e data literacy; avanzando di livello si inizia a lavorare sulla tensione tra certezza e incertezza, evitando un uso della tensione senza prerequisiti. Questo punto, proposto dai gruppi e recepito come nuova raccomandazione, consente di progettare curricula e valutazioni coerenti per età.

Ora, i quattro obiettivi articolano perché educare alla tensione (sviluppo personale e cittadinanza) e come farlo (mappatura esplicita e progressione per livelli), risolvendo le ambiguità delle bozze iniziali e offrendo una cornice operativa e valutabile per la progettazione didattica. Seguendo questa sintesi, la prof.ssa Levrini ha stilato quattro nuove raccomandazioni:

1. The tension between certainties–uncertainties should be valued in science education as a way to develop attitudes, knowledge and skills to understand, critically analyse and explore different perspectives on the future. In particular, the tension between certainties–uncertainties should be valued to include the affective and emotional tension (e.g. between fear and curiosity) that can either support or prevent the youth to open their imagination toward future.
2. The tension between certainties–uncertainties should be promoted as a gateway to avoid hyper-simplified and polarised views toward naive utopian or dystopian views of the futures. The tension should be valued to open collective and dialogical spaces for imagining a plurality of possible futures and alternative ways to conceptualize the production, application and communication of knowledge.

3. The transformative character of the tension between certainties–uncertainties should be pursued by valuing its multi-dimensional and multi-cultural character. The values and roles of the tension should be indeed mapped along different dimensions: conceptual, epistemological (foundational), cognitive, emotional, identity, institutional (curricular and teacher education), socio-economic-political and cultural. As for the socio-economic-political dimension, differences in knowledge production, knowledge application, and knowledge communication in different contexts should be carefully unpacked and considered.
4. The transformative character of the tension between certainties–uncertainties should be pursued by considering the different levels of education. In lower levels of education, the tension might be used as a training ground to recognize flawed definitions and interpretations of certainty, uncertainty and scientific truth. It is also important to introduce critical thinking skills and how to read and interpret data and, more in general, scientific information. Progressively, throughout the educational grades, facing this tension might be a catalyst to develop critical thinking, agency and self positioning in the way science is produced, distributed, and communicated, as well as the desired futures and outcomes.

5.3 Principi operativi per comunicare ed educare all'incertezza

Alla luce dei commenti emersi all'interno del focus group e delle considerazioni delineate nei capitoli precedenti, in questa sezione si delinea una proposta per principi operativi da considerare per lavorare in modo consapevole con la tensione certezza–incertezza nella comunicazione e nella didattica della scienza, senza evitarla. I principi sono una sintesi ragionata tra le istanze emerse dagli studenti, il quadro teorico su incertezza, scienza post-normale e integrità dell'informazione sviluppato nei capitoli precedenti e il ruolo dei modelli climatici come *boundary objects* che collegano ricerca, decisione e educazione.

Le istanze emerse convergono con la prospettiva post-normale, dove la qualità della conoscenza non si esaurisce in dati, monitoraggi e indicatori, ma dipende anche da come vengono gestite le fasi di *assessment* e *knowledge*. Poiché la comunicazione dell'incertezza richiede punti di vista plurali e dialogo con la società civile e gli *stakeholder*, la richiesta di mappature multidimensionali e contestuali avanzata dai gruppi viene rafforzata.

In questa prospettiva, il processo di modellizzazione assume qui un ruolo operativo perché alcuni modelli funzionano come boundary objects, sufficientemente plastici da adattarsi ai diversi contesti (ricerca, policy, scuola) e sufficientemente stabili da mantenere un'identità condivisa. Quindi, i principi che seguono vanno letti attraverso la lente dei modelli, dove ogni principio indica non solo un orientamento educativo, ma anche un modo concreto di usare modelli, scenari e storyline per costruire ambienti di apprendimento sull'incertezza climatica.

1. Sviluppare una patente epistemica prima di navigare nella tensione “certezza-incertezza”

Dal focus group emerge con forza l’idea che non si possa insegnare l’incertezza né in astratto né limitandosi a mostrare bande di errore o termini probabilistici. In questo contesto, risulta importante differenziare linguaggio, esempi e obiettivi tra i diversi livelli scolastici e l’università, chiarendo che la stessa tensione cambia funzione lungo la progressione. Prima di discutere cosa significhi essere più o meno certi, gli studenti chiedono di chiarire che cosa conta come conoscenza scientifica, quindi che cos’è un dato, cosa distingue una spiegazione da una mera descrizione, che cosa intendiamo per prova e in che senso un risultato è affidabile pur restando rivedibile.

Il primo principio suggerisce quindi una sequenza in due tempi:

1. Alfabetizzazione epistemologica di base, in cui si lavora su concetti come osservazione, inferenza, modello, evidenza, in modo ancorato a pratiche e non solo a definizioni astratte;
2. Riflessione meta-epistemologica, in cui si tematizzano esplicitamente certezza, incertezza, revisione e disaccordo, come parte costitutiva del lavoro scientifico.

La modellizzazione, in questa sequenza, è lo spazio di esercizio della “patente epistemica”. Anche modelli climatici estremamente semplificati – una simulazione che mostra la risposta della temperatura globale a diversi scenari emissivi o un modello a scatole per il bilancio energetico – permettono agli studenti di esplicitare le assunzioni (parametri, schemi fisici, condizioni al contorno), vedere come il cambiamento di una scelta modellistica si traduce in differenze negli output e collegare i grafici d’insieme (come quelli IPCC) alle operazioni concrete di selezione, media e aggregazione.

La progressione verticale, dalla scuola di base all’università, richiede di modulare questa sequenza, facendo prevalere nei primi momenti il lavoro su esempi concreti (esperimenti, giochi di simulazione), mentre nei successivi si può rendere esplicito il legame con scenari climatici e standard IPCC.

2. De-polarizzare le emozioni: dall'equivalenza “certezza=comfort” e “incertezza=paura” a una regolazione consapevole

Il vissuto di ansia e insicurezza legato a incertezza e alla disintermediazione informativa è ben documentato nelle analisi sulla comunicazione del rischio. Pertanto, serve trasparenza sui limiti della conoscenza, sugli spazi deliberativi e sull'alfabetizzazione critica per evitare derive polarizzate. È precisamente il terreno dove la tensione fra certezza e incertezza diventa driver educativo e civico.

L'equivalenza implicita “certezza = sicurezza” e “incertezza = paura”, emersa anche durante il focus group, tende a polarizzare le reazioni e, solitamente, si rischia di affidarsi a promesse rassicuranti di controllo totale, o di cadere nel fatalismo e nella sfiducia generalizzata.

Il secondo principio invita a lavorare sulla gestione delle emozioni in relazione a futuri molteplici, mostrando che certezza e incertezza possono essere sia risorsa che rischio, a seconda di come vengono incorniciate. Anche qui i modelli aiutano, proprio perché ancorano le emozioni a rappresentazioni condivise:

- esplorare con gli studenti una famiglia di scenari (ad esempio, due traiettorie emissive estreme e una intermedia) permette di distinguere tra l'incertezza sul se qualcosa accadrà e l'incertezza sul come e con quali tempi;
- usare storyline modellistiche, cioè racconti di eventi plausibili costruiti a partire da simulazioni (onde di calore, alluvioni, scioglimento di ghiacciai), consente di lavorare su casi concreti, più vicini al vissuto, senza presentare il futuro come completamente indeterminato o totalmente predeterminato.

Il modello, se scelto con cura, diventa un oggetto ponte tra il piano cognitivo (comprendere i vari livelli di incertezza e i vari scenari plausibili a seconda delle scelte che si compiono) e quello emotivo (riconoscere ansia, speranza, senso di agency). Potendo chiedere agli studenti non solo “quale scenario vi sembra più plausibile e perché?”, ma anche “quale scenario vi fa più paura e perché?” e “quali informazioni vi aiuterebbero a sentire di poter agire?”, la discussione potrebbe valorizzare l'intreccio tra i due piani. L'obiettivo non è eliminare le emozioni, ma depolarizzarle, facendo emergere la possibilità di un'insicurezza vigile e non paralizzante.

3. Mappatura multidimensionale: rendere visibili le dimensioni della tensione certezza–incertezza

Durante il focus group è stata messa in luce la tensione certezza–incertezza, non solo nella prospettiva concettuale o statistica, ma anche attraverso altre dimensioni come quella epistemologica, cognitiva, emotiva, identitaria, istituzionale, sociale e politica. Il rischio, nelle pratiche didattiche, è di trattarla come un problema esclusivamente tecnico, riducendola alla gestione degli errori di misura o a un esercizio di lettura di grafici.

Il terzo principio propone di progettare attività che rendano esplicite e navigabili le diverse dimensioni della tensione, usando i modelli come dispositivi di mappatura:

- sul piano concettuale ed epistemologico, il modello consente di discutere quali variabili sono incluse o escluse, quali relazioni causali si assumono e quale tipo di evidenza supporta certe scelte;
- sul piano cognitivo, costringe a confrontarsi con limiti di comprensione (es. difficoltà nella lettura di intervalli di incertezza) e con strategie pratiche per ragionare con informazioni incomplete;
- sul piano istituzionale e sociale, evidenzia che lo stesso output modellistico può entrare in ambienti diverse (IPCC, agenzie nazionali, media, scuola), ciascuna con vincoli e aspettative specifiche.

La modellizzazione, essendo contemporaneamente oggetto di analisi scientifica, strumento di comunicazione istituzionale e materiale didattico, permette di tenere insieme questi livelli.

Un'attività didattica può, ad esempio, partire da una figura dell'IPCC e chiedere agli studenti di smontarla in termini di scelte modellistiche, assunzioni, destinatari, possibili fraintendimenti e attori coinvolti; la mappatura multidimensionale non aggiunge complicazioni, ma rende visibili i nodi reali che gli studenti dovranno affrontare come futuri cittadini o professionisti.

4. Prospettiva culturale e giustizia climatica: per chi contano le incertezze?

Il focus group richiama la necessità di esplicitare i bias culturali (ad esempio, l'eurocentrismo) e di valorizzare la pluralità di futuri e saperi situati, evitando di universalizzare le stesse valenze di certezza/incertezza. Questo si collega direttamente alle asimmetrie di vulnerabilità e responsabilità tra territori, generazioni e gruppi sociali, discusse nel Capitolo 3.

Il quarto principio suggerisce di usare i modelli per interrogare il “per chi” dell’incertezza. Gli stessi scenari climatici globali, quando vengono disaggregati regionalmente, mostrano in primis che alcuni territori (piccoli Stati insulari, regioni artico-alpine, aree già soggette a stress idrico) affrontano rischi e incertezze molto più immediati di altri. Inoltre, la distribuzione degli impatti interseca disuguaglianze socio-economiche pregresse, rendendo alcune popolazioni molto più esposte, pur avendo contribuito meno alle emissioni. Utilizzare queste differenze significa, ad esempio, confrontare mappe modellistiche di impatto su regioni diverse, chiedendo agli studenti di ragionare su chi appare nelle figure, chi resta fuori, quali voci sono rappresentate nei report e quali no.

In questo senso, il principio culturale non è un’aggiunta etica esterna, ma una chiave per leggere l’incertezza stessa: quali incertezze contano, per chi, con quali conseguenze? È su questo sfondo che prende forma un nuovo tipo di domanda di ricerca apertasi lungo il lavoro, che potrebbe guidare possibili studi successivi:

In che modo le questioni di giustizia, equità e prospettive multiculturali entrano (o mancano) nelle narrazioni e nelle attività didattiche sull’incertezza? Quali implicazioni ci sono per la progettazione curricolare nella produzione e nell’uso dell’informazione climatica?

5. Linguaggi e metafore: modellizzare l'incertezza senza promettere determinatezza assoluta

Infine, il focus group insiste sull'importanza di linguaggi e metafore per raccontare la scienza in modo fedele ma non fuorviante. Il rischio, nel parlare di modelli, è di oscillare tra due estremi: da un lato, un gergo iper-tecnico che rende l'incertezza opaca e inaccessibile; dall'altro, metafore che rassicurano promettendo una determinatezza che la scienza non può garantire.

Il quinto principio invita a usare metafore e storyline che mantengano visibile l'incertezza, senza trasformarla né in puro rumore né in minaccia. La metafora delle matrioske, emersa nel focus group, è un esempio efficace in quanto rappresenta i livelli annidati della conoscenza (dai modelli concettuali agli Earth System Models, fino alle figure sintetiche dell'IPCC) e mostra che ogni strato aggiunge contesto e complessità, anziché una verità definitiva. L'uso consapevole di metafore, come il "laboratorio virtuale" e i "futuri ramificati", aiuta gli studenti a pensare con i modelli senza reificarli¹². La metafora non sostituisce la formalizzazione, ma la accompagna, rendendo esplicito il fatto che ciò che vediamo è una rappresentazione situata, adeguata a uno scopo, e non una copia del futuro.

12 **Reificare:** Considerare come concreto ciò che è astratto

5.3.1 Commento sui principi

Con i cinque principi proposti si vuole costituire una sorta di cornice orientativa per chi progetta attività educative e comunicative sul clima. Sono, in un certo senso, una traduzione operativa della prospettiva post-normale e dell’idea di modelli climatici come *boundary objects* che permettono di lavorare con la tensione certezza–incertezza senza appiattirla né sul polo rassicurante né su quello paralizzante.

Dal punto di vista concettuale, i principi sintetizzano tre linee sviluppate nei capitoli precedenti. La prima è l’esigenza di alfabetizzazione epistemica, cioè di rendere visibili cosa sono dati, modelli, evidenze, inferenze, e come si costruisce nella pratica una conoscenza al tempo stesso robusta e rivedibile. Il principio della “patente epistemica” esplicita questa esigenza: prima di chiedere agli studenti di stare dentro la tensione certezza–incertezza, è necessario che abbiano gli strumenti minimi per capire che cosa rende affidabile una spiegazione scientifica, quali sono i margini di incertezza inevitabili e quali sono, invece, lacune o distorsioni informative. In questo senso, il principio si colloca in continuità con la letteratura sulla natura della scienza e sull’uso didattico dei modelli e delle simulazioni, in cui la distinzione tra osservazioni, modelli e teoria (Allchin, 2013; Gilbert & Justi, 2016; Oh & Oh, 2011; Osborne et al., 2003), il ruolo delle idealizzazioni (de Jong et al., 2013; Weisberg, 2013), e l’idea di adeguatezza allo scopo (Giere, 2004; Parker, 2020) sono tutti elementi che qui vengono utilizzati in una chiave operativa, centrata su attività in cui il modello diventa il luogo in cui la patente epistemica viene esercitata.

Il secondo principio, focalizzato sulla dimensione emotiva, si collega a studi sulla comunicazione del rischio e sull’amplificazione sociale delle incertezze, ma li rilegge in chiave educativa. La polarizzazione “certezza = comfort / incertezza = paura”, richiamata anche nel focus group, è ampiamente documentata negli studi sulla percezione e comunicazione del rischio: da un lato, lavori classici (Cristea et al., 2022; Lowe, 2022; Slovic, 1987; Spiegelhalter, 2017) mostrano come rischi percepiti come ignoti o ambigui generino maggiore ansia; dall’altro, prospettive come il Social Amplification of Risk (Kasperson et al., 1988; Moser, 2010; Renn, 1991) mettono in luce come media e istituzioni finiscano spesso per amplificare tali dinamiche, trasformando informazioni probabilistiche in narrazioni semplificate di sicurezza o catastrofe. Qui, però, la risposta non è proteggere gli studenti dall’incertezza, bensì usarla come leva per una regolazione consapevole delle emozioni: i modelli e le storyline servono a dare forma ai futuri possibili e a posizionare ansia, speranza e senso di agency dentro una rappresentazione condivisa, anziché lasciarli in balia di immagini catastrofiche o rassicurazioni infondate. Questo dialoga sia con gli studi sulla distanza psicologica (Brügger et al., 2015; Keller, 2022; Maiella et al., 2020; McDonald et al., 2015; Spence et al., 2012; Trope & Liberman, 2010), sia con la letteratura in didattica che propone di considerare le emozioni non come rumore ma come parte integrante del lavoro scientifico e dell’apprendimento (Bellocchi et al., 2014; King et al., 2015; Muis et al., 2018; 2021; Tomas et al., 2015; Vilhunen, 2021).

Il terzo principio – la mappatura multidimensionale – porta dentro l’educazione l’idea, sviluppata in chiave teorica nei capitoli 2 e 3, che l’incertezza climatica non sia solo questione di errori statistici o bande di confidenza, ma un nodo in cui si intrecciano dimensioni epistemiche, cognitive, sociali e politiche. Qui la novità non sta tanto nel riconoscere che queste dimensioni esistono (cosa già sottolineata dalla letteratura sulla scienza post-normale e sulla *risk governance*), quanto nel proporre i modelli e le figure IPCC come dispositivi concreti per mapparle in classe. Chiedere agli studenti di smontare una figura, domandandosi che cosa rappresenta, per chi, con quali assunzioni e quali possibili frantendimenti, rende praticabile quella che altrimenti rischierebbe di restare una raccomandazione astratta sulla contestualizzazione. In questo senso, il principio rende visibili le complessità già presenti nelle pratiche reali di comunicazione e decisione.

Il quarto principio, centrato su prospettiva culturale e giustizia climatica, introduce in modo esplicito un elemento che negli ultimi cicli di report IPCC è spesso presente ma non è tematizzato didatticamente: il *per chi* dell’incertezza. Le asimmetrie di vulnerabilità, responsabilità e capacità di risposta rendono impossibile parlare di rischio e incertezza climatica in modo neutro: uno stesso intervallo di proiezione delle precipitazioni ha significati diversi per un piccolo Stato insulare, per un Paese europeo ad alto reddito o per una comunità indigena. Collegare i modelli a mappe di impatto, casi studio locali, narrazioni di comunità vulnerabili significa portare in classe la dimensione di giustizia che, nei capitoli precedenti, abbiamo discusso come sfondo indispensabile per un uso responsabile dell’informazione climatica. In questo modo, il principio si pone in dialogo con le cornici internazionali sulle competenze per la sostenibilità e il *futures thinking*, che includono tra le competenze chiave la capacità di immaginare futuri molteplici e di agire in condizioni di incertezza (Bianchi et al., 2022; UNESCO, 2017; 2021; Wiek et al., 2011).

Infine, il quinto principio – dedicato a linguaggi e metafore – si collega a due filoni: da un lato, gli studi sulla comunicazione visiva e narrativa dei modelli (ad esempio l’approccio storyline come complemento alle rappresentazioni probabilistiche); dall’altro, le ricerche sulla funzione didattica delle metafore nel rendere visibili i livelli di astrazione senza reificarli (Beger & Jäkel, 2015; Duit, 1991; Niebert et al, 2012; Niebert & Gropengiesser, 2015). Ad esempio, la metafora delle matroske illustra bene questo doppio movimento: da un lato, permette di vedere i livelli annidati di rappresentazione (dal modello concettuale all’ESM, fino alle figure sintetiche); dall’altro, ricordano che ogni livello è una costruzione situata, adeguata a uno scopo, e non una foto del futuro. In questo senso, il principio spinge a un uso intenzionale delle metafore, consapevole dei rischi di promuovere, con immagini troppo deterministiche, un’immagine di scienza che promette ciò che non può mantenere.

Insieme, i principi delineano una possibile agenda di utilizzo dal punto di vista didattico, essi possono funzionare come griglia per progettare percorsi verticali:

- nella scuola di base, attività centrate su modelli semplici e giochi di simulazione possono costruire la patente epistemica e introdurre, in forma narrativa, la coesistenza di futuri molteplici;
- nella secondaria superiore, si può ampliare lo spazio per la mappatura multidimensionale e per la discussione di scenari e storyline, includendo la dimensione emotiva e identitaria;
- all'università e nella formazione degli insegnanti, gli stessi principi possono essere usati in modo riflessivo, invitando gli studenti a esplicitare le proprie concezioni di incertezza, a confrontarle con i framework IPCC/IPIE e a progettare essi stessi attività didattiche che mettano al lavoro la tensione certezza-incertezza.

Per i ricercatori e per chi si occupa di interfacce tra scienza, policy e educazione, i principi offrono anche una bussola per pensare alla coerenza tra diversi livelli: se alcuni modelli possono essere davvero considerati come boundary objects, allora il modo in cui l'IPCC rappresenta e comunica l'incertezza dovrebbe essere, almeno in parte, allineabile con il modo in cui la scuola la insegna. La patente epistemica, la de-polarizzazione emotiva, la mappatura multidimensionale, il focus sul "per chi" e l'uso responsabile di metafore e storyline possono così essere letti come tentativi di tradurre, sul piano educativo, questioni che nei capitoli 2 e 3 sono emerse sul piano filosofico e istituzionale: adeguatezza allo scopo, forza della conoscenza e integrità dell'informazione.

Naturalmente, si tratta di una proposta ancora esplorativa. I principi nascono da un singolo focus group con studenti di Fisica e da una sintesi di letterature eterogenee; vanno quindi intesi come ipotesi di lavoro, da mettere alla prova in contesti diversi (discipline, ordini di scuola, Paesi) e da raffinare sulla base delle pratiche. Alcune tensioni sono già visibili: quanto è sostenibile, in termini di carico cognitivo e tempo curricolare, chiedere a insegnanti e studenti di lavorare su così tante dimensioni contemporaneamente? Come sostenere i docenti che, a loro volta, possono provare disagio nel cedere controllo e nel sostare in situazioni di incertezza in classe? Quali strumenti di valutazione possono rendere visibili competenze come l'epistemic reflexivity o la capacità di ragionare in termini di futuri alternativi?

Queste domande non indeboliscono la proposta, ma ne indicano il potenziale. Invece di trattare l'incertezza come un tema accessorio, i principi invitano a farne un filo conduttore che connette modelli, emozioni, giustizia e narrazioni del futuro.

Conclusione

Questa tesi è nata dall'intreccio di tre urgenze: la gravità della crisi climatica, la crisi di integrità dell'informazione che la circonda e la necessità di un'educazione scientifica capace di trattare l'incertezza in modo esplicito, contestualizzato e culturalmente sensibile.

La tesi si inserisce in un filone di ricerca già corroborato ma in espansione, che cerca di gestire la complessità dei cambiamenti climatici senza annullarne le incertezze caratteristiche, evidenziando modalità e strumenti che possono aiutare in questo processo.

In particolare, l'obiettivo di questa tesi è stato mostrare come l'incertezza nei modelli climatici e nei report dell'IPCC possa essere riformulata non come fallimento della scienza, ma come risorsa per la comprensione, la decisione e la formazione di una cittadinanza climatica consapevole.

Le domande di ricerca a cui si è tentato di rispondere sono le seguenti:

1. Quali sono le difficoltà intrinseche nella rappresentazione dell'incertezza nei modelli climatici, considerando fonti epistemiche e aleatorie, gerarchie modellistiche e tensione tra affidabilità e informatività?
2. Come viene gestita e comunicata l'incertezza ai decisori? Quali soglie di prova sono in gioco e come si bilanciano errori di diverse tipologie nel passaggio dalla sintesi scientifica alla decisione?
3. Quali difficoltà emergono nel trasferimento dall'IPCC alle scuole, dalla comprensione dei qualificatori probabilistici alla distinzione tra incertezza e affidabilità e alle pratiche che rendono l'incertezza un motore di apprendimento?
4. A partire dal confronto tra quadro teorico e voci degli studenti, è possibile elaborare principi operativi, per comunicare e insegnare l'incertezza climatica, che valorizzino la tensione certezza-incertezza come risorsa cognitiva ed emotiva?

Rispetto alla prima domanda di ricerca, il percorso svolto nei Capitoli 1 e 2 ha messo in luce che le difficoltà intrinseche nella rappresentazione modellistica del clima derivano dal carattere selettivo, idealizzato e "adeguato a uno scopo" dei modelli. La distinzione fra incertezza epistemica, aleatoria e riflessiva ha permesso di chiarire che non tutta l'incertezza è riducibile a "mancanza di dati", limiti dei modelli o a pura variabilità stocastica: esistono margini di ignoranza strutturale, scelte pragmatiche di parametrizzazione e, soprattutto, legami con decisioni sociali e tecnologiche che modificano le traiettorie possibili. In questo quadro, i modelli climatici appaiono come dispositivi che bilanciano continuamente affidabilità e informatività: non eliminano l'incertezza, ma la rendono pensabile attraverso intervalli, scenari e storylines fisicamente coerenti.

La seconda domanda di ricerca ha spostato il fuoco sull'IPCC. L'analisi del *framework* di confidenza e *likelihood* e delle critiche mosse in letteratura ha mostrato una tensione tra l'esigenza di standardizzare il linguaggio dell'incertezza e la ricchezza delle pratiche da cui tale linguaggio emerge. Da un lato, la calibrazione dei termini ("likely", "high confidence", ecc.) rende più trasparente il grado di supporto delle affermazioni e chiarisce il legame fra evidenza, consenso e probabilità.

Dall'altro, la definizione ristretta di rischio come funzione di probabilità e conseguenze tende a comprimere dimensioni etiche, distributive e di ignoranza profonda, proprio quelle che la scienza post-normale e la società del rischio mettono al centro.

La terza domanda di ricerca ha riguardato la trasposizione didattica dall'interfaccia IPCC-policy al mondo educativo. La rassegna della letteratura in didattica delle scienze ha mostrato che l'incertezza può essere un potente oggetto di apprendimento, a patto di evitare due estremi: da un lato l'immagine di una scienza infallibile che cancella i margini di errore; dall'altro la narrativa del "se non siamo sicuri al 100%, allora vale tutto". Argomentazione scientifica, lavoro con dati reali, lettura guidata di figure e bande d'incertezza, uso di storyline climatiche e ragionamento probabilistico (anche in chiave bayesiana qualitativa) emergono come strategie che aiutano gli studenti a vedere come la conoscenza si costruisce, si corregge e resta affidabile pur essendo rivedibile.

In questa prospettiva, l'attenzione alle dimensioni emotive del rapporto con il futuro è risultata cruciale. Alcune forme di comunicazione dell'incertezza possono aumentare senso di impotenza o ansia, altre invece possono sostenere agency e immaginazione di futuri desiderabili. Il passaggio dall'IPCC alla scuola e all'università richiede dunque un doppio lavoro di traduzione: concettuale (icontestualizzare intervalli e livelli di confidenza in situazioni comprensibili agli studenti) e affettivo (accompagnare le emozioni che l'incertezza climatica suscita).

La quarta domanda di ricerca è stata affrontata nel Capitolo 5, attraverso il focus group con cinque studenti del corso magistrale in Didattica e Storia della Fisica. L'analisi delle loro discussioni attorno alle raccomandazioni SIG-8 ha permesso di articolare una quadripartizione di obiettivi (personale-emotivo, sociale-politico, mappatura multidimensionale e multiculturale, progressione per livelli educativi) e di distillare cinque principi operativi per comunicare ed educare all'incertezza:

1. Sviluppare una patente epistemica prima di navigare nella tensione "certezza-incertezza": non si può chiedere agli studenti di navigare la complessità senza aver prima costruito basi su prove, modelli, errori e revisione della conoscenza.
2. De-polarizzare le emozioni: lavorare sull'equivalenza implicita "certezza = sicurezza" e "incertezza = paura", per costruire forme di insicurezza vigile che non sfocino né nel rifiuto né nel fatalismo.
3. Mappatura multidimensionale: rendere visibili le diverse dimensioni della tensione certezza-incertezza (epistemica, cognitiva, istituzionale, mediale), usando i modelli come dispositivi per tenere insieme questi piani.

4. Prospettiva culturale e giustizia climatica: chiedersi sempre per chi contano le incertezze, quali prospettive sono incluse o escluse, come si distribuiscono rischi e benefici nella geografia del potere climatico.
5. Linguaggi e metafore responsabili: modellizzare l'incertezza senza promettere una determinatezza che la scienza non può garantire, usando metafore e storyline che mantengano il legame con la fisica e con i contesti di vita.

Nel loro insieme, questi principi rappresentano una proposta per riallineare il lavoro educativo al cuore del processo IPCC e alla pratica modellistica da cui esso trae origine. Anziché trattare le categorie di *confidence*, *likelihood* o gli scenari come etichette da importare tali e quali in classe, i principi invitano a reinterpretarle alla luce delle attività concrete che gli studenti possono svolgere con modelli, dati e storyline: discutere quali ipotesi sono in gioco, come cambiano gli esiti al variare dei parametri, quali margini di incertezza restano aperti e perché. In questo modo, l'interfaccia tra IPCC e scuola non è più un semplice trasferimento di risultati, ma diventa uno spazio di negoziazione in cui il linguaggio calibrato dell'incertezza viene tradotto in esperienze di indagine e riflessione, mantenendo la continuità con le pratiche scientifiche che lo hanno generato. Ancorare i principi ai modelli climatici e al quadro dell'IPCC significa, in ultima analisi, trattare l'incertezza come un contenuto epistemico centrale che mette in continuità la costruzione modellistica, la sintesi dei report e le esperienze di apprendimento in classe.

Aspetti critici della tesi

Il lavoro presenta alcuni limiti importanti dal punto di vista empirico. Il focus group ha coinvolto un numero ridotto di studenti, tutti iscritti al corso magistrale in Didattica e Storia della Fisica e già sensibilizzati alla riflessione sulla natura della scienza e sulla didattica della fisica. Si tratta quindi di un campione di convenienza, relativamente omogeneo per percorso formativo e interessi, che non consente alcuna pretesa di generalizzabilità dei risultati. Le considerazioni emerse vanno lette come esplorative e generative di ipotesi, più che come base per conclusioni robuste su popolazioni più ampie di studenti o insegnanti.

Inoltre, la tesi non include una sperimentazione sistematica in classe dei principi proposti, né una valutazione quantitativa del loro impatto su conoscenze, atteggiamenti e vissuti emotivi degli studenti. Come visto nel capitolo 5, la scelta è stata intenzionale ed è stato invitato un piccolo gruppo di studenti che potessero portare sia uno sguardo interno (familiarità con il discorso didattico ed epistemologico sulla scienza), sia uno sguardo generazionale, in quanto destinatari diretti delle proposte di educazione ai futuri studenti. Ne consegue che i principi operativi formulati nel Capitolo 5 sono stati costruiti a partire dall'intreccio tra stato

dell'arte e focus group, ma non sono ancora stati messi alla prova in percorsi didattici strutturati, con raccolta di dati pre–post o confronti tra classi. Manca, in questo senso, una triangolazione tra ciò che gli studenti dichiarano in un contesto di discussione guidata e ciò che effettivamente accade quando docenti e studenti si confrontano con attività curricolari centrate sull'incertezza climatica.

Un'ulteriore criticità riguarda la natura intrinsecamente interdisciplinare della tesi. Questa natura può essere vista sia come punto di forza che come debolezza: da una parte l'intreccio tra la climatologia fisica, la filosofia della scienza, gli studi sull'IPCC, la didattica delle scienze e le analisi dell'ecosistema informativo, ha permesso di costruire una cornice concettuale più ricca, in cui i modelli climatici e l'incertezza non sono letti solo come oggetti tecnici, ma come nodi in cui si intrecciano dimensioni epistemiche, comunicative ed educative; d'altro canto, muoversi tra tutti questi ambienti implica attraversare comunità scientifiche con linguaggi, tradizioni e criteri di qualità differenti e, nonostante il tentativo di costruire un quadro il più possibile coerente, è probabile che alcuni contributi rilevanti – soprattutto in letterature molto vaste e in rapido aggiornamento – non siano stati intercettati o siano stati solo sfiorati. La scelta delle fonti è quindi necessariamente selettiva e orientata dalle domande di ricerca: questo conferisce coerenza al percorso, ma al prezzo di lasciare in ombra altri filoni potenzialmente significativi.

Infine, pur mettendo al centro la dimensione della giustizia climatica, il lavoro resta principalmente ancorato a prospettive europee e nord–globali, sia nella letteratura di riferimento sia nel campione empirico. Anche questo è un limite importante perché la tesi discute le geografie della produzione di conoscenza e le asimmetrie di vulnerabilità, ma non le esplora empiricamente in contesti plurali.

Ulteriori sviluppi per la tesi

Proprio i limiti appena discussi indicano alcune direzioni promettenti per sviluppi futuri della ricerca.

Un primo asse di lavoro riguarda l'estensione a campioni più ampi e diversificati. Una possibilità concreta è replicare il focus group – o adattarlo in forma di laboratorio – con:

- insegnanti in formazione iniziale, ad esempio studenti di corsi di laurea magistrale in formazione insegnanti o percorsi abilitanti, per capire come i cinque principi dialoghino con le loro concezioni di scienza, rischio e responsabilità educativa;
- insegnanti in servizio di scuola secondaria di I e II grado, inserendo l'attività all'interno di corsi di aggiornamento professionale: si potrebbero utilizzare le raccomandazioni SIG8 e i principi della tesi come materiali di discussione, raccogliendo dati qualitativi (discussioni, diari riflessivi) e questionari su atteggiamenti verso l'incertezza;
- studenti di altri corsi universitari (ad esempio corsi di laurea in Scienze ambientali, Scienze della formazione, Comunicazione), per esplorare come la tensione certezza–incertezza e il ruolo dei modelli vengano percepiti fuori dal contesto della fisica;
- contesti non formali, come musei scientifici, science café o progetti di educazione ambientale, dove i principi potrebbero essere tradotti in attività brevi (laboratori su figure IPCC, giochi di ruolo su scenari climatici) e valutati in termini di coinvolgimento e comprensione dei visitatori.

Un secondo asse riguarda lo sviluppo di percorsi didattici completi basati sui cinque principi, da studiare con metodologie di *design-based research*. Ad esempio, si potrebbe progettare un'unità didattica di alcune settimane per una classe di scuola secondaria superiore, in cui:

- gli studenti lavorano con semplici simulazioni climatiche e figure IPCC per costruire una “patente epistemica” sui concetti di modello, scenario e incertezza;
- vengono proposte storyline centrate su eventi estremi (ondate di caldo, alluvioni) per esplorare la coesistenza di futuri molteplici e il ruolo delle scelte politiche;
- si svolgono attività di mappatura multidimensionale che intrecciano dimensioni fisiche, sociali ed emotive dell'incertezza;
- gli studenti progettano piccoli prodotti comunicativi (poster, podcast, brevi video) in cui esplicitano le metafore e le scelte narrative adottate.

In una logica di *design-based research*, il percorso verrebbe co-progettato con i docenti, sperimentato in classe, analizzato attraverso osservazioni, registrazioni video, interviste e questionari, e poi successivamente tarato in cicli successivi. Ciò permetterebbe di mettere alla prova, raffinare o eventualmente riformulare i principi, verificando quali siano effettivamente gestibili nel tempo curricolare e quali abbiano maggiore impatto su comprensioni e atteggiamenti degli studenti.

Un terzo filone di sviluppo riguarda l'approfondimento della dimensione di giustizia climatica, in particolare rispetto alle geografie della produzione di conoscenza e ai vuoti documentati nel Global South. A partire dalle domande emerse nel Capitolo 5, si potrebbero progettare studi che:

- analizzano in modo sistematico la composizione geografica e disciplinare degli autori e dei casi studio citati nei report IPCC e nei materiali didattici sul clima, rendendo visibili squilibri e assenze;
- costruiscono attività in cui gli studenti confrontano storyline e mappe di impatto relative a regioni diverse (ad esempio piccoli Stati insulari, aree artico-alpine, città europee), discutendo chi è reso visibile e chi no nelle rappresentazioni standard;
- sviluppano collaborazioni tra classi situate in contesti differenti (Nord e Sud globale), che lavorano sugli stessi materiali modellistici e scambiano narrazioni sulle proprie vulnerabilità e priorità, esplicitando così il “per chi” dell’incertezza.

Infine, un quarto asse di ricerca riguarda la progettazione di interventi di *climate information literacy* che integrino criticamente social media, visualizzazioni e narrazioni. I principi elaborati nella tesi potrebbero tradursi in:

- attività in cui gli studenti analizzano post, video o infografiche sul cambiamento climatico circolanti sui social media, valutandoli alla luce delle dimensioni di integrità informativa (accuratezza dei dati, coerenza interna, affidabilità delle fonti, trasparenza delle assunzioni);
- esercizi di riscrittura di contenuti mediatici: ad esempio, trasformare un post allarmistico o negazionista in una breve storyline che espliciti ipotesi, incertezze e implicazioni di giustizia climatica;
- laboratori di produzione in cui gli studenti progettano essi stessi visualizzazioni e narrazioni (thread, reel, podcast) su scenari climatici, riflettendo sulle metafore utilizzate, sui rischi di semplificazione e sul modo in cui rappresentano l’incertezza.

Tali interventi potrebbero essere valutati attraverso griglie che misurano non solo la correttezza concettuale, ma anche la capacità di riconoscere bias, di argomentare su base di prove e di posizionarsi criticamente rispetto ai flussi informativi. In questo modo, la tesi potrebbe evolvere verso un programma di ricerca–intervento che collega più strettamente la riflessione teorica su modelli, incertezza e giustizia climatica con pratiche educative concrete, situate in una pluralità di contesti.

References

- Adams, W. K., Perkins, K. K., Podolefsky, N. S., Dubson, M., Finkelstein, N. D., & Wieman, C. E. (2006). New instrument for measuring student beliefs about physics and learning physics: The Colorado Learning Attitudes about Science Survey. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 2(1), 010101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.010101>
- Adler, C. E., & Hirsch Hadorn, G. (2014). The IPCC and treatment of uncertainties: Topics and sources of dissensus. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(5), 663–676. <https://doi.org/10.1002/wcc.297>
- Akkerman, S. F., & Bakker, A. (2011). Boundary crossing and boundary objects. *Review of Educational Research*, 81(2), 132–169. <https://doi.org/10.3102/0034654311404435>
- Allchin, D. (2012). Teaching the nature of science through scientific error. *Science Education*, 96(5), 904–926. <https://doi.org/10.1002/sce.21019>
- Allchin, D. (2013). *Teaching the Nature of Science: Perspectives & Resources*. SHiPS Education Press, Saint Paul, MN, USA, 2013. xiii + 310 pp. ISBN 978-0-9892524-0-9. <https://doi.org/10.1002/sce.21131>
- Allen, M. R. (2003). Liability for climate change. *Nature*, 421(6926), 891–892. <https://doi.org/10.1038/421891a>
- Allie, S., Buffler, A., Campbell, B., Lubben, F., Evangelinos, D., Psillos, D., & Sarris, A. (1998). First-year physics students' perceptions of the quality of experimental measurements. *International Journal of Science Education*, 20(4), 447–459. <https://doi.org/10.1080/0950069980200405>
- Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251), 237–276. <https://doi.org/10.1080/14786449608620846>
- Arrow, K. J. (1963). *Social choice and individual values* (2nd ed.). New Haven, CT: Yale University Press.
- Aven, T., & Renn, O. (2015). An evaluation of the treatment of risk and uncertainties in the IPCC reports on climate. *Risk Analysis*, 35(4), 701–712. <https://doi.org/10.1111/risa.12298>
- Bailer-Jones, D. M. (2009). *Scientific models in philosophy of science*. University of Pittsburgh Press. ISBN:9780822971238
- Baldissera Pacchetti, M., Dessai, S., Bradley, S., & Stainforth D.A. (2021). Assessing the quality of regional climate information in practice. *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0008.1>

- Baldissera Pacchetti, M., Lloyd, E. A., Dessai, S., Parker, W. S., & Rizzo, A. (2024). Perspectives on the quality of climate information for adaptation decision support. *Climatic Change* (2024) 177:163. <https://doi.org/10.1007/s10584-024-03823-1>
- Ballard, T., & Lewandowsky, S. (2015). When, not if: The inescapability of an uncertain climate future. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2055), 20140464. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0464>
- Barelli, E. (2017). Science of complex systems and future-scaffolding skills: A pilot study with secondary school students. Alma Mater Studiorum – Università di Bologna.
- Barelli, E. (2021). Physics and Mathematics university students' ideas about computer simulations. *Journal of Physics: Conference Series*, 1929, 012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1929/1/012059>
- Barelli, E., Branchetti, L., Tasquier, G., Albertazzi, L., & Levrini, O. (2018). Science of complex systems and citizenship skills: A pilot study with adult citizens. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 14(4), 1533–1545. <https://doi.org/10.29333/ejmste/84841>
- Beck, U. (1992). Risk society: Towards a new modernity. Tradotto dal tedesco da Mark Ritter, con un'introduzione di Lash, S. & Wynne, B. London. Sage Publications, 1992 [originale publ. 1986].
- Beck, U. (1999). World risk society. Cambridge: Polity Press.
- Bellocchi, A., Ritchie, S. M., Tobin, K., King, D., Sandhu, M., & Henderson, S. (2014). Emotional climate and high quality learning experiences in science teacher education. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(10), 1301–1325. <https://doi.org/10.1002/tea.21170>
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Springer New York, NY. Kluwer Academic Publishers 2002. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- Bianchi, G., Pisiotis, U., & Cabrera Giraldez, M. (2022). GreenComp: The European sustainability competence framework (EUR 30955 EN). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/13286>
- Bokulich, A., & Parker, W. S. (2021). Data models, representation, and adequacy-for-purpose. *The British Journal for the Philosophy of Science*. <https://doi.org/10.1007/s13194-020-00345-2>
- Bouchée, T., de Putter - Smits, L., Thurlings, M. & Pepin, B. (2021). Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses: A systematic review. *Physical Review in Physics Education Research*. <https://doi.org/10.1080/03057267.2021.1963579>

- Boykoff, M. T., & Boykoff, J. M. (2004). Balance as bias: Global warming and the U.S. prestige press. *Global Environmental Change*, 14(2), 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.001>
- Bralower, T. & Bice, D. Earth 103: Earth in the Future. Module 4: Introduction to General Circulation Models. <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/524>
- Branchetti, L., Cutler, M., Laherto, A., Levrini, O., Palmgren, E. K., Tasquier, G., & Wilson, C. (2018). The I SEE project: An approach to futurize STEM education. *Visions for Sustainability*, 9, 10–26. <https://doi.org/10.13135/2384-8677/2770>
- Brügger, A., Dessai, S., Devine-Wright, P. et al. Psychological responses to the proximity of climate change. *Nature Clim Change* 5, 1031–1037 (2015). <https://doi.org/10.1038/nclimate2760>
- Brulle, R. J. (2013). Institutionalizing delay: Foundation funding and the creation of U.S. climate change counter-movement organizations. *Climatic Change*, 122(4), 681–694. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1018-7>
- Budescu, D. V., Broomell, S. B., & Por, H. H. (2009). Improving communication of uncertainty in the reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Psychological Science*, 20(3), 299–308. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02284.x>
- Budescu, D. V., Por, H.-H., & Broomell, S. B. (2012). Effective communication of uncertainty in the IPCC reports. *Climatic Change*, 113(2), 181–200. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0330-3>
- Budescu, D. V., Por, H.-H., Broomell, S. B., & Smithson, M. (2014). The interpretation of probabilistic statements around the world. *Nature Climate Change*, 4(6), 508–512. <https://doi.org/10.1038/nclimate2194>
- Budyko, M. I. (1969). The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 21(5), 611–619. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v21i5.10109>
- Buffler, A., Allie, S., & Lubben, F. (2001). The development of first year physics students' ideas about measurement in terms of point and set paradigms. *International Journal of Science Education*, 23(11), 1137–1156. <https://doi.org/10.1080/09500690110039567>
- Cann, H. W., & Raymond, L. (2018). Does climate denialism still matter? The prevalence of alternative frames in opposition to climate policy. *Environmental Politics*, 27(3), 433–454. <https://doi.org/10.1080/09644016.2018.1439353>
- Carey, S., & Smith, C. (1993). On understanding the nature of scientific knowledge. *Educational Psychologist*, 28(3), 235–251. https://doi.org/10.1207/s15326985ep2803_4
- Cartwright, N. (1983). *How the laws of physics lie*. Clarendon Press.
- Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., Jäger, J., & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the*

National Academy of Sciences, 100(14), 8086–8091.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1231332100>

Ceppi, P., & Nowack, P. (2021). *Observational evidence that cloud feedback amplifies global warming*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(30), e2026290118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2026290118>

Chen, Y.-C. (2020). Dialogic pathways to manage uncertainty for productive engagement in scientific argumentation: A longitudinal case study grounded in an ethnographic perspective. *Science & Education*, 29(2), 331–375.
<https://doi.org/10.1007/s11191-020-00111-z>

Chen, Y.-C., & Qiao, X. (2020). Using students' epistemic uncertainty as a pedagogical resource to develop knowledge in argumentation. *International Journal of Science Education*, 42(13), 2145–2180.
<https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1813349>

Chen, Y.-C., Benus, M. J., & Hernandez, J. (2019). Managing uncertainty in scientific argumentation. *Science Education*, 103(5), 1235–1276. <https://doi.org/10.1002/sce.21527>

Copernicus Climate Change Service (C3S). (2024). Warmest January on record, 12-month average over 1.5 °C above pre-industrial. <https://climate.copernicus.eu/warmest-january-record-12-month-average-over-15degc-above-preindustrial>

Corbett, J. B., & Durfee, J. L. (2004). Testing public (un)certainty of science: Media representations of global warming. *Science Communication*, 26(2), 129–151.
<https://doi.org/10.1177/1075547004270234>

Cornell Law School, Legal Information Institute. (2022). Preponderance of the evidence. In Wex: Legal encyclopedia. https://www.law.cornell.edu/wex/preponderance_of_the_evidence

Covitt, B. A., & Anderson, C. W. (2022). Untangling trustworthiness and uncertainty in science: Implications for science education. *Science & Education*, 31, 1155–1180.
<https://doi.org/10.1007/s11191-022-00322-6>

Cristea, F., Weishaar, H., Geurts, B., Delamou, A., Tan, M. M. J., Legido-Quigley, H., Aminu, K., Mari-Sáez, A., Rocha, C., Camara, B., Barry, L., Thea, P., Boucsein, J., Bahr, T., Al-Awlaqi, S., Pozo-Martin, F., Boklage, E., Jegede, A. S., & El Bcheraoui, C. (2022). A comparative analysis of experienced uncertainties in relation to risk communication during COVID-19: A four-country study. *Globalization and Health*, 18, 66.
<https://doi.org/10.1186/s12992-022-00857-x>

de Jong, T., Linn, M. C., & Zacharia, Z. C. (2013). Physical and virtual laboratories in science and engineering education. *Science*, 340(6130), 305–308.
<https://doi.org/10.1126/science.1230579>

De Pryck, K., & Hulme, M. (2022). A critical assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009082099>

Dessai, S., & Hulme, M. (2004). Does climate adaptation policy need probabilities? *Climate Policy*, 4(2), 107–128. <https://doi.org/10.1080/14693062.2004.9685515>

Dudley, M. Z., Bernier, R., Brewer, J., & Salmon, D. A. (2021). Walking the tightrope: Reevaluating science communication in the era of COVID-19 vaccines. *Vaccine*, 39(39), 5453–5455. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.08.037>

Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75(6), 649–672. <https://doi.org/10.1002/sce.3730750606>

Elbeyi, E., Bruhn Jensen, K., Aronczyk, M., Asuka, J., Ceylan, G., Cook, J., Erdelyi, G. F. H., Milani, C., Mustafaraj, E., Ogenga, F., Yadin, S., Howard, P. N., & Valenzuela, S. (2025). Information integrity about climate science: A systematic review. IPIE. <https://doi.org/10.61452/BTZP3426>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmdd-8-10539-2015>

European Science Education Research Association. (n.d.). *SIG 8 – Futures-oriented science education*. ESERA. <https://www.esera.org/esera-special-interest-groups/sig8-futures-oriented-science-education/>

Faletič, S., & Pavlin, J. (Eds.). (2024). *Teaching and learning physics effectively in challenging times*. (Series: *Challenges in Physics Education*). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-72541-8>

Feucht, F. C., Lunn Brownlee, J., & Schraw, G. (2017). Moving beyond reflection: Reflexivity and epistemic cognition in teaching and teacher education. *Educational Psychologist*, 52(4), 234–241. <https://doi.org/10.1080/00461520.2017.1350180>

Foss, J. (2025). Teacher candidates' epistemic reflexivity about elementary science instruction. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 7, 11. <https://doi.org/10.1186/s43031-025-00129-9>

Frigg, R., & Hartmann, S. (2025). Models in science. In E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford encyclopedia of philosophy* (edizione 2025). Metaphysics Research Lab, Stanford University. <https://plato.stanford.edu/entries/models-science/>

Frigg, R., Thompson, E., & Werndl, C. (2015). Philosophy of climate science. Part I: Observing climate change. *Philosophy Compass*, 10(12), 953–964. <https://doi.org/10.1111/phc3.12285>

Frigg, R., Thompson, E., & Werndl, C. (2015). Philosophy of climate science. Part II: Modelling climate change. *Philosophy Compass*, 10(12), 965–977. <https://doi.org/10.1111/phc3.12297>

Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, 25(7), 739–755. [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(93\)90022-L](https://doi.org/10.1016/0016-3287(93)90022-L)

Funtowicz, S. O., & Ravetz, J. R. (2022). Scienza post-normale: Riflessioni e prospettive. In Scienza, politica e società: L'approccio post-normale in teoria e nelle pratiche. CNR Edizioni. <https://doi.org/10.26324/SIA1.PNS>

Gardner, G. (2024, 2 maggio). We asked for science. We got sustain-a-babble. The Steady State Economy. <https://steadystate.org/we-asked-for-science-we-got-sustain-a-babble/>

Garland, D. (2003). The rise of risk. In R. V. Ericson & A. Doyle (Eds.), Risk and morality (pp. 48–86). University of Toronto Press. <https://doi.org/10.3138/9781442679382-005>

Gettelman, A., & Rood, R. B. (2016). *Demystifying Climate Models: A User's Guide to Earth System Models*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48959-8>

Giddens, A. (1990). *The consequences of modernity*. Stanford University Press, Stanford, CA.

Giere, R. N. (1988). Explaining science: A cognitive approach to scientific reasoning. University of Chicago Press.

Giere, R. N. (2004). How models are used to represent reality. *Philosophy of Science*, 71(5), 742–752. <https://doi.org/10.1086/425063>

Gigerenzer, G., Hertwig, R., van den Broek, E., Fasolo, B., & Katsikopoulos, K. V. (2005). “A 30% chance of rain tomorrow”: How does the public understand probabilistic weather forecasts? *Risk Analysis*, 25(3), 623–629. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00608.x>

Gilbert, J. K., & Justi, R. (2016). *Modelling-based teaching in science education*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29039-3>

Goosse, H., Barriat, P.-Y., Lefebvre, W., Loutre, M.-F., & Zunz, V. (2010). *Introduction to climate dynamics and climate modelling*. Université catholique de Louvain.

Gordon, M. (2006). Welcoming confusion, embracing uncertainty: Educating teacher candidates in an age of certitude. *Paideusis*, 15(2), 15–25. <https://doi.org/10.7202/1072677ar>

Gramelsberger, G. (2011). What do numerical (climate) models really represent? *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 42(2), 296–30. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2010.11.037>

Greer, K., & Glackin, M. (2021). ‘What counts’ as climate change education? Perspectives from policy influencers. *School Science Review*, 103(383), 15–22.

Hammer, D. (1994). Epistemological beliefs in introductory physics. *Cognition and Instruction*, 12(2), 151–183. https://doi.org/10.1207/s1532690xci1202_4

Harris, A. J. L., Por, H.-H., & Broomell, S. B. (2017). Anchoring climate change communications. *Climatic Change*, 140(3), 387–398. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1859-y>

- Hawkins, E., & Sutton, R. (2009). The potential to reduce uncertainty in regional climate projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1095–1107. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>
- Hazeleger, W., Van den Hurk, B. J. J. M., Min, E., Van Oldenborgh, G. J., Petersen, A. C., Stainforth, D. A., et al. (2015). Tales of future weather. *Nature Climate Change*, 5(2), 107–113. <https://doi.org/10.1038/nclimate2450>
- Hesse, M. B. (1966). *Models and analogies in science*. University of Notre Dame Press.
- Hodson, D. (2011). *Looking to the future: Building a curriculum for social activism*. Sense Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-6091-472-0>
- Holmes, N. G., & Wieman, C. E. (2018). Introductory physics labs: We can do better. *Physics Today*, 71(1), 38–45. <https://doi.org/10.1063/PT.3.3816>
- Huang, Y., & Yang, C. (2020). A metacognitive approach to reconsidering risk perceptions and uncertainty: Understand information seeking during COVID-19. *Science Communication*, 42(5), 616–642. <https://doi.org/10.1177/1075547020959818>
- Hulme, M. (2009). *Why we disagree about climate change: Understanding controversy, inaction and opportunity*. Cambridge University Press.
- InterAcademy Council. (2010). *Climate change assessments: Review of the processes and procedures of the IPCC*. InterAcademy Council. https://archive.ipcc.ch/pdf/IAC_report/IAC%20Report.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (1990). Climate change: The IPCC scientific assessment. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/climate-change-the-ipcc-scientific-assessment/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). Climate change 2007: Synthesis report. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report (H. Lee & J. Romero, Eds.). IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

- James, I. N. (1994). *Introduction to circulating atmospheres*. Cambridge University Press.
- Jasanoff, S. (2010). A new climate for society. *Theory, Culture & Society*, 27(2–3), 233–253. <https://doi.org/10.1177/0263276409361497>
- Jonassen, R., & Pielke, R. A., Jr. (2011). Improving conveyance of uncertainties in the findings of the IPCC. *Climatic Change*, 108(4), 745–753. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0185-7>
- Jordan, R. (2015). Variation in students' propensities for managing uncertainty while engaging in design tasks. *International Journal of Science Education*, 37(6), 1046–1071. <https://doi.org/10.1080/j.ijsed.2015.01.005>
- Jordan, J. R., & Babrow, A. S. (2013). Communication in creative collaborations: The challenges of uncertainty and desire related to task, identity, and relational goals. *Communication Education*, 62(1), 45–64. <https://doi.org/10.1080/03634523.2013.769612>
- Joslyn, S. L., Nadav-Greenberg, L., & Nichols, R. M. (2009). Probability of precipitation: Assessment and enhancement of end-user understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(2), 185–193. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2509.1>
- Joslyn, S. L. & Savelli, S. (2010). Communicating forecast uncertainty: Public perception of weather forecast uncertainty. *Meteorological Applications*, 17(2), 180–195. <https://doi.org/10.1002/met.190>
- Juanchich, M. & Sirota, M. (2016). How to improve people's interpretation of probabilities of precipitation. *Journal of Risk Research*, 19(3), 388–404. <https://doi.org/10.1080/13669877.2014.983945>
- Kampourakis, K. & McCain, K. (2019). Uncertainty: How it makes science advance. *Oxford University Press*. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190871666.001.0001>
- Kasperson, R. E., Renn, O., Slovic, P., Brown, H. S., Emel, J., Goble, R., Kasperson, J. X., & Ratick, S. (1988). The social amplification of risk: A conceptual framework. *Risk Analysis*, 8(2), 177–187. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1988.tb01168.x>
- Kause, A., Bruine de Bruin, W., Persson, J., Thoren, H., Olsson, L., Wallin, A., Dessai, S. & Vareman, N. (2022). Confidence levels and likelihood terms in IPCC reports: A survey of experts from different scientific disciplines. *Climatic Change*, 173(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03382-3>
- Keller, A., Marsh, J. E., Richardson, B. H., & Ball, L. J. (2022). A systematic review of the psychological distance of climate change: Towards the development of an evidence-based construct. *Journal of Environmental Psychology*, 81, 101822. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2022.101822>
- Kinkeldey, C., MacEachren, A. M., & Schiewe, J. (2014). How to assess visual communication of uncertainty? A systematic review of geospatial uncertainty visualisation user studies. *Cartographic Journal*, 51(4), 372–386. <https://doi.org/10.1179/1743277414Y.0000000099>

Kirch, S. A. (2010). Identifying and resolving uncertainty as a mediated action in science: A comparative analysis of the cultural tools used by scientists and elementary science students at work. *Science Education*, 94(2), 308–335. <https://doi.org/10.1002/sce.20362>

Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, A. J., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F., Fiore, A. M., Kimoto, M., Meehl, G., Prather, M., Sarr, A., Schär, C., Sutton, R., van Oldenborgh, G. J., Vecchi, G., & Wang, H.-J. (2013). *Near-term climate change: Projections and predictability* (Chapter 11). In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 953–1028). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.023>

Krijtenburg-Lewerissa, K., Pol, H. J., Brinkman, A., & van Joolingen, W. R. (2017). Insights into teaching quantum physics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review Physics Education Research*, 13(1), 010109.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.13.010109>

Lakatos, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In I. Lakatos & A. Musgrave (Eds.), *Criticism and the growth of knowledge* (pp. 91–196). Cambridge University Press.

Lamb, W. F., Mattioli, G., Levi, S., Roberts, J. T., Capstick, S., Creutzig, F., ... Steinberger, J. K. (2020). Discourses of climate delay. *Global Sustainability*, 3, e17.

<https://doi.org/10.1017/sus.2020.13>

Laymon, R.: 1991, "Idealizations and the Reliability of Dimensional Analysis", in Paul Durbin (ed.), *Critical Perspectives on Nonacademic Science and Engineering*, Lehigh University Press, Bethlehem, pp. 146-180.

Lee, K., Gjersoe, N., O'Neill, S., & Barnett, J. (2020). Youth perceptions of climate change: A narrative synthesis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(3), e641.

<https://doi.org/10.1002/wcc.641>

Lewandowsky, S., Ballard, T., & Pancost, R. D. (2015). *Uncertainty as knowledge*. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 373(2055), 1–11.

<https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0462>

Li, J., Kohnle, A., & Passante, G. (2021). Student difficulties with quantum uncertainty in the context of discrete probability distributions. In *Physics Education Research Conference 2021, PERC Proceedings*. American Association of Physics Teachers.

<https://doi.org/10.1119/perc.2021.pr.Li>

Lloyd, E. A., & Oreskes, N. (2018). Climate change attribution: When is it appropriate to accept new methods? *Earth's Future*, 6(3), 311–332. <https://doi.org/10.1002/2017EF000665>

Lloyd, E. A., & Oreskes, N. (2019). Climate change attribution: When does it make sense to add methods? *Epistemology & Philosophy of Science*, 56(1), 185–201.

<https://doi.org/10.5840/eps201956115>

- Lloyd, E. A., Oreskes, N., Seneviratne, S. I., & Larson, E. J. (2021). Climate scientists set the bar of proof too high. *Climatic Change*, 165, 55. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03061-9>
- Løhre, E., Juanchich, M., Sirota, M., Teigen, K. H., & Shepherd, T. G. (2019). Climate scientists' wide prediction intervals may be more likely but are perceived to be less certain. *Weather, Climate, and Society*, 11(3), 565–575. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-18-0136.1>
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20(2), 130–141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2)
- Lorenz, E. N. (1965). A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 17(3), 321–333.
- Lorenz, E. N. (1969a). Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(4), 636–646. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)26<636:APARBN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)26<636:APARBN>2.0.CO;2)
- Lorenz, E. N. (1969b). Three approaches to atmospheric predictability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 50(5), 345–349.
- Lowe, A. E., Voo, T. C., Lee, L. M., Dineen Gillespie, K. K., Feig, C., Ferdinand, A. O., Mohapatra, S., Brett-Major, D. M., & Wynia, M. K. (2022). Uncertainty, scarcity and transparency: Public health ethics and risk communication in a pandemic. *The Lancet Regional Health – Americas*, 16, 100374. <https://doi.org/10.1016/j.lana.2022.100374>
- Lunn Brownlee, J., Ferguson, L. E., & Ryan, M. (2017). Changing teachers' epistemic cognition: A new conceptual framework for epistemic reflexivity. *Educational Psychologist*, 52(4), 242–252. <https://doi.org/10.1080/00461520.2017.1333430>
- Maiella, R., La Malva, P., Marchetti, D., Pomarico, E., Di Crosta, A., Palumbo, R., Cetara, L., Di Domenico, A., & Verrocchio, M. C. (2020). The psychological distance and climate change: A systematic review on the mitigation and adaptation behaviors. *Frontiers in Psychology*, 11, 568899. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.568899>
- Manz, E., & Suárez, E. (2018). Supporting teachers to negotiate uncertainty for science, students, and teaching. *Science Education*, 102(4), 771–795. <https://doi.org/10.1002/sce.21343>
- Marshall, J., & Plumb, R. A. (2008). Atmosphere, ocean, and climate dynamics: An introductory text. Academic Press.
- Mason, A., & Newell, B. R. (2025). The best or worst is yet to come: How optimism and pessimism shape beliefs about future climate projections among the general public and experts [Preprint]. OSF Preprints. https://doi.org/10.31234/osf.io/3fsra_v2
- Massimi M (2018). Perspectival Modeling. *Philosophy of Science*;85(3):335-359. <https://doi.org/10.1086/697745>

Mastrandrea, M. D., Field, C. B., Stocker, T. F., Edenhofer, O., Ebi, K. L., Frame, D. J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K. J., Matschoss, P. R., Plattner, G.-K., Yohe, G. W., & Zwiers, F. W. (2010). Guidance note for lead authors of the IPCC Fifth Assessment Report on consistent treatment of uncertainties. IPCC.

<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf>

Mastrandrea, M. D., & Mach, K. J. (2011). Treatment of uncertainties in IPCC assessment reports: Past approaches and considerations for the Fifth Assessment Report. *Climatic Change*, 108(4), 659–673. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0177-7>

Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G.-K., Edenhofer, O., Stocker, T. F., Field, C. B., Ebi, K. L., & Matschoss, P. R. (2011). The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: A common approach across the working groups. *Climatic Change*, 108, 675–691. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0178-6>

McDonald, R. I., Chai, H. Y., & Newell, B. R. (2015). Personal experience and the 'psychological distance' of climate change: An integrative review. *Journal of Environmental Psychology*, 44, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.10.003>

McMullin, E. (1985). Galilean idealization. *Studies in History and Philosophy of Science*, 16(3), 247–273.

Miani, L., & Levrini, O. (2024). Analysing the storyline approach's competence-developing potential for climate change in science education. In *Teaching and learning physics effectively in challenging times* (pp. 253–266). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72541-8_17

Miani, L., Bitsaki, C., Metaxas, I., Levrini, O., & Stavrou, D. (2025a). Embracing complexity and uncertainties to deal with climate change challenges: A science education perspective. *Research in Science Education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-00658-9>

Miani, L., De Zuani Cassina, F., & Levrini, O. (2025b). Raising awareness on the complexity of decision-making through climate change education. *Research in Science Education*. <https://doi.org/10.1007/s11191-025-10266-w>

Michaels, D. (2008). Doubt is their product: How industry's assault on science threatens your health. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1289/ehp.117-a218a>

Monroe, M. C., Plate, R. R., Oxarart, A., Bowers, A., & Chaves, W. A. (2019). Identifying effective climate change education strategies: A systematic review of the research. *Environmental Education Research*, 25(6), 791–812. <https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1360842>

Morgan, M. S., & Morrison, M. (Eds.). (1999). *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511660108.003>

Moser, S. C. (2010). Communicating climate change: History, challenges, process and future directions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1), 31–53. <https://doi.org/10.1002/wcc.11>

- Murphy, A. H., Lichtenstein, S., Fischhoff, B., & Winkler, R. L. (1980). Misinterpretation of precipitation probability forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61(7), 695–701. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1980\)061<0695:MOPPF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1980)061<0695:MOPPF>2.0.CO;2)
- Muis, K. R., Pekrun, R., Sinatra, G. M., Azevedo, R., Trevors, G., Meier, E., & Heddy, B. C. (2018). The role of epistemic emotions in personal epistemology and self-regulated learning. *Educational Psychologist*, 53(3), 165–184. <https://doi.org/10.1080/00461520.2017.1421465>
- Muis, K. R., Psaradellis, C., Lajoie, S. P., Di Leo, I., Chevrier, M., & Mahbub, U. (2021). Epistemic emotions and epistemic cognition predict students' critical thinking. *Frontiers in Education*, 6, 669908. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.669908>
- Nagler, R. H., Vogel, R. I., Gollust, S. E., Rothman, A. J., Fowler, E. F., & Yzer, M. C. (2020). Public perceptions of conflicting information surrounding COVID-19: Results from a nationally representative survey of U.S. adults. *PLOS ONE*, 15(10), e0240776. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240776>
- Nguyen, J. (2020). It's not a game: Accurate representation with toy models. *British Journal for the Philosophy of Science*, 71(3), 1013–1041. <https://doi.org/10.1093/bjps/axz010>
- Nguyen, J., & Frigg, R. (2022). Maps, models, and representation. In K. Khalifa, I. Lawler, & E. Shech (Eds.), *Scientific understanding and representation: Modeling in the physical sciences* (pp. 296–300). Routledge.
- Niebert, K., & Gropengiesser, H. (2012). Understanding and communicating climate change in metaphors. *Environmental Education Research*, 19(3), 282–302. <https://doi.org/10.1080/13504622.2012.690855>
- North, G. R., Cahalan, R. F., & Coakley, J. A. (1981). Energy balance climate models. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 19(1), 91–121. <https://doi.org/10.1029/RG019i001p00091>
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011). What teachers of science need to know about models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(3), 423–456. <https://doi.org/10.1080/09500690903568383>
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., & Belitz, K. (1994). Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, 263(5147), 641–646. <https://doi.org/10.1126/science.263.5147.641>
- Oreskes, N & Conway, E.M. (2010). *Merchants of Doubt: How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming*. 355 pp., bibl., index. New York: Bloomsbury Press, 2010.
- Osborne, J., Simon, S., & Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1049–1079. <https://doi.org/10.1080/0950069032000032199>
- Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation: A necessary distinction? *Science Education*, 95(4), 627–638. <https://doi.org/10.1002/sce.20438>

- Parker, W. S. (2010). Whose probabilities? Predicting climate change with ensembles of models. *Philosophy of Science*, 77(5), 985–997. <https://doi.org/10.1086/656815>
- Parker, W. S. (2020). Model evaluation: An adequacy-for-purpose view. *Philosophy of Science*, 87(3), 457–477. <https://doi.org/10.1086/708693>
- Parker, W. S., & Risbey, J. S. (2015). False precision, surprise and improved uncertainty assessment. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 37320140453. <http://doi.org/10.1098/rsta.2014.0453>
- Phillips, A. M., Watkins, J., & Wieman, C. E. (2021). Not engaging with problems in the lab: Students' navigation of conflicting data and models. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 020112. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.020112>
- Pietrocola, M., Rodrigues, E., Bercot, F., & Schnorr, S. (2021). Risk society and science education: Lessons from the COVID-19 pandemic. *Science & Education*, 30(2), 209–233. <https://doi.org/10.1007/s11191-020-00176-w>
- Potochnik, A. (2017). *Idealization and the aims of science*. University of Chicago Press.
- Purcell, A & Huddleston, N. (2016). National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2016. *Frontiers in Decadal Climate Variability: Proceedings of a Workshop*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23552>.
- Redish, E. F., Saul, J. M., & Steinberg, R. N. (1998). Student expectations in introductory physics. *American Journal of Physics*, 66(3), 212–224. <https://doi.org/10.1119/1.18847>
- Renn, O. (1991). Risk communication and the social amplification of risk. In R. E. Kasperson & P. J. M. Stallen (Eds.), *Communicating risks to the public: International perspectives* (pp. 287–324). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1952-5_14
- Retchless, D. P., & Brewer, C. A. (2016). Guidance for representing uncertainty on global temperature change maps. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1143–1159. <https://doi.org/10.1002/joc.4408>
- Reutlinger, A., Hangleiter, D., & Hartmann, S. (2018). Understanding (with) toy models. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 69(4), 1069–1099. <https://doi.org/10.1093/bjps/axx005>
- Rittel, H. W. J., & Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 4(2), 155–169. <https://doi.org/10.1007/BF01405730>
- Rosenberg, J. M., Kubsch, M., Wagenmakers, E.-J., & Dogucu, M. (2022). Making sense of uncertainty in the science classroom: A Bayesian approach. *Science & Education*, 31, 1215–1236. <https://doi.org/10.1007/s11191-022-00341-3>
- Rousell, D., & Cutter-Mackenzie-Knowles, A. (2020). A systematic review of climate change education: Giving children and young people a 'voice' and a 'hand' in redressing climate change. *Children's Geographies*, 18(2), 191–208. <https://doi.org/10.1080/14733285.2019.1614532>

- Rovelli, C. (2018). Physics needs philosophy. Philosophy needs physics. *Foundations of Physics*, 48(5), 481–491. <https://doi.org/10.1007/s10701-018-0167-y>
- Ruggeri, P. (2023–2024). *Climatology* [Lecture notes]. Università di Bologna.
- Sadaghiani, H., & Bao, L. (2006). Student difficulties in understanding probability in quantum mechanics. In L. McCullough, L. Hsu, & P. Heron (Eds.), *2005 Physics Education Research Conference: AIP Conference Proceedings* (Vol. 818, pp. 61–64). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.2177023>
- Sakschewski, B., Caesar, L., Andersen, L., Bechthold, M., Bergfeld, L., Beusen, A., Billing, M., Bodirsky, B. L., Botsyun, S., Dennis, D., Donges, J. F., Dou, X., Eriksson, A., Fetzer, I., Gerten, D., Häyhä, T., Hebdon, S., Heckmann, T., Heilemann, A., ... Rockström, J. (2025). Planetary Health Check 2025: A scientific assessment of the state of the planet. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). <https://doi.org/10.48485/pi.k.2025.017>
- Schneider, S. H. (1984). Climate modeling: Scientist's and public's expectations. In B. Bolin (Ed.), *The climate of the future: A scientific assessment* (pp. 65–87). John Wiley & Sons.
- Sellers, W. D. (1969). A global climatic model based on the energy balance of the Earth-atmosphere system. *Journal of Applied Meteorology*, 8(3), 392–400. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1969\)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008<0392:AGCMBO>2.0.CO;2)
- Shackley, S., & Wynne, B. (1996). Representing uncertainty in global climate change science and policy: Boundary-ordering devices and authority. *Science, Technology, & Human Values*, 21(3), 275–302. <https://doi.org/10.1177/016224399602100302>
- Shepherd, T. G., Boyd, E., Calel, R. A., Chapman, S. C., Dessai, S., Dima-West, I. M., et al. (2018). Storylines: An alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Climatic Change*, 151(3), 555–571. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2317-9>
- Shepherd, T. G. (2019). Storyline approach to the construction of regional climate change information. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 475(2225), 20190013. <https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0013>
- Shepherd, T. G., & Lloyd, E. A. (2021). Meaningful climate science. *Climatic Change*, 169, 17. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03246-2>
- Slovic, P. (1987). Perception of risk. *Science*, 236(4799), 280–285. <https://doi.org/10.1126/science.3563507>
- Spence, A., Poortinga, W., & Pidgeon, N. (2012). The psychological distance of climate change. *Risk Analysis*, 32(6), 957–972. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01695.x>
- Spiegelhalter, D. (2017). Risk and uncertainty communication. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 4, 31–60. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-010814-020148>

- Spiegelhalter, D., & Riesch, H. (2011). Don't know, can't know: embracing deeper uncertainties when analysing risks *Phil. Trans. R. Soc. A*. 369:4730–4750.
<http://doi.org/10.1098/rsta.2011.0163>
- Stein, M. M., Smith, E. M., & Holmes, N. G. (2018). Confirming what we know: Understanding questionable research practices in introductory physics labs. In *Physics Education Research Conference 2018, PERC Proceedings* (pp. 380–385 circa). American Association of Physics Teachers. <https://doi.org/10.1119/perc.2018.pr.Stein>
- Stone, P. H., & Risbey, J. S. (1990). On the limitations of general circulation climate models. *Geophysical Research Letters*, 17(12), 2173–2176.
<https://doi.org/10.1029/GL017i012p02173>
- Stott, P. A., Stone, D. A., & Allen, M. R. (2004). Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432(7017), 610–614. <https://doi.org/10.1038/nature03089>
- Strevens, M. (2008). *Depth: An account of scientific explanation*. Harvard University Press.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv1dv0tnw>
- Suppes, P. (2002). Representation and Invariance of Scientific Structures. CSLI Publications (distributed by Chicago University Press).
- Teigen, K. H. (2022). Dimensions of uncertainty communication: What is conveyed by verbal terms and numeric ranges. *Current Psychology*, 42, 29122–29137.
<https://doi.org/10.1007/s12144-022-03985-0>
- Teller, P. (2001). Twilight of the perfect model model. *Erkenntnis*, 55(3), 393–415.
<https://doi.org/10.1023/A:1013349314515>
- Tibone, F. (2021, 23 settembre). *Che cos'è il clima e quali fenomeni lo influenzano?* Aula di scienze – Zanichelli. <https://aulascienze.scuola.zanichelli.it/speciali-scienze/conferenza-di-glasgow-cop-26/?content=clima-e-fenomeni>
- Trenberth, K. E., Cheng, L., Jacobs, P., Zhang, Y., & Fasullo, J. (2018). Hurricane Harvey links to ocean heat content and climate change adaptation. *Earth's Future*, 6(5), 730–744.
<https://doi.org/10.1029/2018EF000825>
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, 5(8), 725–730. <https://doi.org/10.1038/nclimate2657>
- Trope, Y., & Liberman, N. (2010). Construal-level theory of psychological distance. *Psychological Review*, 117(2), 440–463. <https://doi.org/10.1037/a0018963>
- UNESCO. (2017). *Education for Sustainable Development Goals: Learning objectives*. UNESCO.
- UNESCO. (2021). *Reimagining our futures together: A new social contract for education*. UNESCO.

van der Bles, A. M., van der Linden, S., Freeman, A. L. J., Mitchell, J., Galvao, A. B., Zaval, L., & Spiegelhalter, D. J. (2019). Communicating uncertainty about facts, numbers and science. *Royal Society Open Science*, 6(5), 181870. <https://doi.org/10.1098/rsos.181870>

van der Bles, A. M., van der Linden, S., Freeman, A. L. J., Mitchell, J., Galvao, A. B., Zaval, L., & Spiegelhalter, D. J. (2020). The effects of communicating uncertainty on public trust in facts and numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(14), 7672–7683. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913678117>

van Egmond, S., & Zeiss, R. (2010). Modeling for policy: Science-based models as performative boundary objects for Dutch policymaking. *Science & Technology Studies*, 23(1), 58–78. <https://doi.org/10.23987/sts.55257>

van Fraassen, B. C. (1980). The scientific image. Oxford University Press. ISBN: 9780198244271

Virdee TS. (2016). Beyond the standard model of particle physics. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2016 Aug 28;374(2075):20150259. PMID: 27458261. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0259>.

Volkwyn, T., Allie, S., Buffler, A., & Lubben, F. (2008). Impact of a conventional introductory physics laboratory course on the understanding of measurement. *Physical Review Special Topics – Physics Education Research*, 4(1), 010108. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010108>

Vosniadou, S., & Ortony, A. (1989). Similarity and analogical reasoning. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529863>

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (2nd ed.). Academic Press

Watkins, J., Hammer, D., Lucey, C., & Van Horne, K. (2018). Positioning as not-understanding: The value of showing uncertainty for engaging in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(4), 573–599. <https://doi.org/10.1002/tea.21431>

Watson, A. J., & Lovelock, J. E. (1983). Biological homeostasis of the global environment: The parable of Daisyworld. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 35(4), 284–289. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v35i4.14616>

Watson-Hernández, F., & Guzmán-Arias, I. (2025). Between Uncertainty and Responsibility: A Philosophical Inquiry into Climate Change Projections. *Philosophies*, 10(4), 91. <https://doi.org/10.3390/philosophies10040091>

Weaver, C. P., Lempert, R. J., Brown, C., Hall, J. A., Revell, D., & Sarewitz, D. (2013). Improving the contribution of climate model information to decision making: The value and demands of robust decision frameworks. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 4(1), 39–60. <https://doi.org/10.1002/wcc.202>

Weisberg, M. (2013). *Simulation and similarity: Using models to understand the world*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199933662.001.0001>

Wiek, A., Withycombe, L., & Redman, C. L. (2011). Key competencies in sustainability: A reference framework for academic program development. *Sustainability Science*, 6(2), 203–218. <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0132-6>

Windschitl, M. (2002). Framing constructivism in practice as the negotiation of dilemmas: An analysis of the conceptual, pedagogical, cultural, and political challenges facing teachers. *Review of Educational Research*, 72(2), 131–175.
<https://doi.org/10.3102/00346543072002131>

World Meteorological Organization. (2017). *Guidelines on the calculation of climate normals* (WMO-No. 1203). World Meteorological Organization.

Wüthrich, N. (2017). Conceptualizing uncertainty: An assessment of the uncertainty framework of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 57, 31–46. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2016.12.003>

Zion, M., & Mendelovici, R. (2012). Moving from structured to open inquiry: Challenges and limits. *Science Education International*, 23(4), 383–399.

<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:45660480>