

TRIBUNALE DI ROMA

Seconda Sezione Civile - G.I. Dott. Corrado Cartoni

R.G. N. 26468/2023

Nella causa promossa da

Greenpeace Onlus, Recommon APS et al.

contro

Eni S.p.A., Cassa Depositi e Prestiti S.p.A. e Ministero dell'Economia e delle Finanze

RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA

resa nell'interesse di Eni S.p.A. in relazione alla ricostruzione della c.d. *Attribution Science* e relativa inadeguatezza per ricostruire la responsabilità giuridica di soggetti privati in relazione a potenziali danni climatici.

Milano, 20 Settembre 2023

Prof. Ing. Daniele Bocchiola, PhD



*Prof. Associato di Costruzioni Idrauliche e Marittime e Idrologia nel Politecnico di Milano
Co: Climate-Lab, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano
Leonardo da Vinci 32, 20133, Milano
Phone: +39 02-2399-6223
Fax: +39 02-2399-6207
e-mail: daniele.bocchiola@polimi.it*

Sommario

Executive Summary	4
1 Introduzione.....	8
2 Focus principale su <i>Source Attribution</i>	9
3 <i>Source Attribution, SA</i> , inquadramento scientifico.....	11
3.1 Genesi della SA, la Proposta Brasiliana.....	11
3.2 Perimetro della SA e strumenti necessari.....	11
3.3 Complessità nell’attribuzione ed effetti non-lineari.....	13
3.4 Modellistica climatica per la SA	14
3.5 Metodologie per la SA	16
3.6 <i>Source Attribution</i> nell’AR6 IPCC	22
4 Lavori di letteratura citati. Discussione e affidabilità.....	23
4.1 <i>Source Attribution</i> , compagnie Oil&Gas	23
4.2 Heede et al. (2014a;2014b)	24
4.2.1 Metodi e risultati principali.....	24
4.2.2 Emissioni ENI.....	27
4.2.3 Fonti di incertezza.....	30
4.2.4 Implicazioni per la <i>Source Attribution</i>	32
4.3 Ekwurzel et al. (2017)	33
4.3.1 Valori delle variabili climatiche-oceaniche di rilievo per la citazione	33
4.3.2 Metodi.....	39
4.3.3 Il modello FAIR.....	41
4.3.4 Il modello GSL.....	43
4.3.5 Risultati principali.....	44
4.3.6 Analisi di sensitività.....	45
4.4 Licker et al. 2019.....	54
4.4.1 Metodi.....	54
4.4.2 Risultati principali.....	55
4.4.3 Emissioni ENI ed effetti sul pH.....	56
4.4.4 Analisi di incertezza.....	58
4.5 Contributo non lineare.....	58
5 Considerazioni su <i>Impact e Extreme Events Attribution</i>	59
5.1 Rilevanza.....	59
5.2 <i>Extreme Events Attribution e Fraction of Attributable Risk FAR</i>	59
5.3 <i>Impact Attribution</i>	60

6	Considerazioni conclusive e rapporti con il contenzioso	61
6.1	Atto di citazione e lavori di letteratura considerati	61
6.2	Aspetti Istituzionali/negoziali. UNFCCC, IPCC e Proposta Brasiliana.....	61
6.3	Aspetti tecnico-scientifici.....	62
6.3.1	Heede (2014b).....	62
6.3.2	Ekwurzel et al. (2017).....	63
6.3.3	Variabili fisiche di interesse nell'Atto e nella SA e scale spazio-temporali.....	63
6.4	Incertezza nelle stime delle variabili e osservazioni disponibili	65
6.5	Non proporzionalità dei fattori emissivi.....	68
7	Glossario.....	69
7.1	Lista degli acronimi principali	69
7.2	Lista dei simboli e variabili principali.....	71
8	Bibliografia.....	72

Executive Summary

Introduzione

Nell'ambito del giudizio di primo grado davanti al Tribunale di Roma – R.G. n. 26468/2023 – instaurato da ReCommon APS e Greenpeace Onlus contro ENI, nonché contro Cassa Depositi e Prestiti S.p.A. e il Ministero dell'Economia e delle Finanze, gli Attori propongono a sostegno delle loro tesi le conclusioni e/o elaborazioni condotte in alcuni recenti lavori (articoli) di letteratura. Tali lavori sono relativi al tema della *Source Attribution*, definita come “*l'identificazione del contributo relativo di differenti settori, attività ed entità ai cambiamenti climatici*”. I lavori citati nell'Atto di citazione, qui in Tabella 1, riportano stime di indicatori atti ad essere utilizzati come prove della responsabilità (completa, o parziale) di ENI nel cambiamento climatico, inteso come cambiamento dei valori medi di alcune variabili climatiche di riferimento. Tali stime sono state condotte sulle basi di inventari emissivi e modelli matematici.

Lavori citati nell'Atto di citazione

In Tabella 1 sono riportati i lavori di letteratura citati nell'Atto di citazione, a sostegno delle tesi degli Attori in relazione al tema della *Source Attribution*. In sintesi, è possibile indicare le seguenti affermazioni rilevanti in tema di *Source Attribution*, tutte riportate a p. 44 dell'Atto stesso:

“*Per venire a ENI, le sue emissioni cumulative di CO₂ e CH₄ nel periodo 1988-2015 ammontano allo 0.6% delle emissioni cumulate globali (Heede, 2014)*”

e

“*Il data base su cui si basa il lavoro di Ekwurzel et al. (2017) consente di attribuire ad Eni nel periodo 1980-2010: 1) fra 0.309 e 0.395 ppm di contribuzione all'aumento della CO₂ in atmosfera; 2) fra 0,0013 e 0,0037 °C di contribuzione all'aumento temperatura media terrestre globale; e 3) fra 0.04 e 0.21 (0.27, ndr) mm di aumento globale del livello dei mari.*”

Infine

“*Il data base dello studio Licker et al. (2019) consente di evidenziare che nel periodo 1980-2015 Eni ha contribuito ad acidificare gli oceani, riducendo il pH per un intervallo compreso tra 0,000365 e 0,000444*”.

Cit.	Pag. (prima cit.)	Macro-Tema e composti target	Entità
Heede R, 2014a. Carbon majors: accounting for carbon emissions 1854–2010. Methods & Results Report, 98 pp., Annex B: Methodology. Climate Mitigation Services, Snowmass, CO.	p. 43	Report non <i>peer reviewed</i> con inventario di emissioni dei maggiori emettitori per le emissioni in atmosfera. E (GtC)	Oil&Gas-Cement Manif.
Heede, R., 2014b. Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers, 1854–2010. Climatic change 122(1): 229-241.	p. 43	Responsabilità proporzionali dei maggiori emettitori per le emissioni in atmosfera. E (GtC)	Oil&Gas-Cement Manif.
Ekwurzel, B., Boneham, J., Dalton, M. W., Heede, R., Mera, R. J., Allen, M. R., & Frumhoff, P. C., 2017. The rise in global atmospheric CO ₂ , surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers. Climatic Change 144(4): 579-590.	p. 43	Responsabilità proporzionali dei maggiori emettitori per incrementi di CO ₂ , temperatura e livello marino.	Oil&Gas-Cement Manif.
Licker, R., Ekwurzel, B., Doney, S. C., Cooley, S. R., Lima, I. D., Heede, R., & Frumhoff, P. C., 2019. Attributing ocean acidification to major carbon producers. Environmental Research Letters, 14(12), 124060.	p. 43	Responsabilità proporzionali dei maggiori emettitori per variazioni di pH marino	Oil&Gas-Cement Manif.

Tabella 1 Lavori scientifici relativi al tema della *Source Attribution* citati nell'Atto di citazione.

Analisi del tema Source Attribution

L'estensore di questo *report* conduce una rapida analisi della letteratura disponibile relativa al tema della *Source Attribution*, dei modelli e metodi utilizzati, dei risultati presentati.

E' possibile in base a tale analisi, proporre alcune conclusioni relativamente al tema della *Source Attribution* e del procedimento pendente davanti al Tribunale di Roma.

Limiti dell'esercizio di Source Attribution e sua introduzione nell'Atto di citazione

1) Nell'ambito del più recente lavoro di valutazione dell'IPCC AR6 (WGI-III) il tema della *Source Attribution* è di fatto poco considerato, né tantomeno si fornisce un approccio per una valutazione "formale/standard", secondo il metodo IPCC. Il metodo SA è ancora ad uno stadio in sostanza seminale a parere di chi scrive.

2) La Proposta Brasiliana BP è stata presentata nel 1997 nell'ambito dei lavori della UNFCCC, con lo scopo di quantificare l'effetto/responsabilità emissive sui fenomeni di cambiamento climatico. Tale proposta riguardava esplicitamente gli effetti emissivi entità ben definite, ossia gli stati ed i governi, e non è mai stata formalmente implementata.

3) I modelli utilizzati simulano la risposta non lineare del sistema terra-atmosfera agli input emissivi e delle successive modifiche, radiativa e termica e marina. Tale risposta non lineare non consente in alcun modo di ipotizzare una relazione lineare tra gli input emissivi, in valore assoluto e/o percentuale e la relativa risposta in termini climatici.

4) Esistono differenti metodologie per condurre l'esercizio di Source Attribution, con differenze relative dei risultati che possono divenire importanti, anche in dipendenza dall'uso che si vuol fare dei risultati. Non è ad oggi possibile definire un valore unico ed affidabile per tale esercizio.

5) I modelli utilizzati per gli esercizi di *Source Attribution* qui citati semplificano in maniera estrema, tramite una modellazione in forma puntuale/concentrata (un solo valore medio per il globo terrestre), la risposta del sistema terrestre al rilascio di emissioni. Tale approccio non è coerente con la complessità spaziale del sistema terra-atmosfera e con la logica della Source Attribution, che richiederebbe, almeno concettualmente, la discriminazione di impatti emissivi e contributi alle variazioni dei parametri meteo-climatici su base spaziale (poiché teoricamente emissioni derivanti da specifici emettitori sarebbero anche connotati da una caratterizzazione geografica). I risultati proposti risentono quindi di tale limitazione.

6) L'Atto di citazione si riferisce per lo più a eventi e variabili di tipologie differenti, rispetto a quelle oggetto degli studi di Source Attribution citati e attualmente disponibili. In particolare, i modelli utilizzati valutano l'effetto di emissioni/concentrazioni, su variabili mediate a scala globale, rappresentative di processi *slow-onset* (a lento sviluppo), quali incrementi della temperatura media, del livello medio marino, etc.. L'Atto di citazione si riferisce ad eventi estremi (*extreme events*, o *rapid-onset events*), passati e localizzati nello spazio e nel tempo, quali alluvioni pluviali, periodi secchi, *i.e.* siccità climatica, velocità del vento (uragani, etc.), incendi (connessi a siccità/alte temperature). Tali eventi e le relative attribuzioni climatiche, non sono di fatto considerate nell'Atto di citazione, né tantomeno nella letteratura attuale. Le citazioni scientifiche portate dagli Attori, sembrano quindi non rilevanti rispetto alla tipologia di evento dannoso per cui si chiede di accertare la responsabilità di Eni e non provano quindi l'assunto alla base di tale richiesta.

Criticità relative ai lavori citati nell'Atto di citazione

7) Il lavoro di Heede (2014b) rappresenta un esercizio di inventario emissivo. Tale lavoro ipotizza, più o meno esplicitamente di valutare i contributi emissivi e rispettive responsabilità sui cambiamenti climatici a livello di stati, per passare ad una valutazione basata su singole compagnie/enti. Tuttavia, tale approccio non è mai stato discusso, né tantomeno proposto/ratificato in sede UN, UNFCCC, IPCC.

8) Le stime di Heede (2014b), secondo l'autore stesso, comportano un errore globale del 10-15% almeno (e verosimilmente di più per singoli emettitori). Tale errore può di fatto riversarsi sulle stime successive relative ai contributi e sarebbero quindi necessarie ulteriori valutazioni rispetto a tale incertezza.

9) Le stime di Heede (2014b) includono la componente SCOPE3, legata direttamente alle emissioni da combustione dei consumatori. Tale componente copre circa il 90% delle emissioni. Sembra ovvio ipotizzare che, non includendo tali emissioni tra quelle attribuite direttamente ad ENI, le emissioni da inventario sarebbero 9-10 volte minori e similmente diminuirebbero gli impatti stimati di tali emissioni.

10) I risultati di Ekwurzel et al. (2017) soffrono di incertezze di vario tipo, documentate nel presente report, che richiedono una attenta valutazione. In sintesi, tali incertezze dipendono da i) incerta valutazione della sensitività climatica del sistema terra-atmosfera ed, in generale, dei numerosi (>15) parametri del modello FAIR da loro utilizzato, ii) mancanza di dati su aerosol da combustione, tracciabili ai diversi emettitori (con possibili effetti di mitigazione), iii) ordine (cronologico) di rimozione delle emissioni. Da un'analisi (parziale e carente di validità statistica) dell'incertezza dei risultati condotta degli autori stessi, si osservano comunque elevati margini di incertezza, fino al $\pm 75\%$ nella valutazione dei contributi stimati di ENI (e verosimilmente di altri emettitori) alle variazioni delle *grandezze target*, *i.e.* concentrazioni di CO_{2e}, temperature medie globali, livello medio marino. Tali ampie incertezze rendono del tutto difficile ed inaffidabile una eventuale ripartizione percentuale delle pretese responsabilità di singoli soggetti.

11) I valori stimati di variazione delle variabili target forniti da Ekwurzel et al. (2017), tutti proporzionalmente molto piccoli, raggiungono ordini di grandezza, non significativi/misurabili nell'ambito dell'incertezza di stima. In particolare, tali valori rappresentano in sostanza "astrazioni modellistiche", che difficilmente potrebbero trovare un riscontro significativo in termini di misura. Tali deviazioni teoriche dai valori osservati delle variabili di interesse (tipicamente, incrementi dovuti alla presenza dei cambiamenti climatici), mostrano di fatto valori caratteristici notevolmente (1-2 ordini di grandezza) più piccoli dell'incertezza (deviazione standard) di stima dei corrispondenti valori osservati. In sostanza, si può ipotizzare che gli incrementi attribuiti ad ENI, abbiano un significato modellistico chiaro, ma un valore del tutto irrilevante rispetto alla effettiva capacità di valutare su scala globale variazioni termiche. In sintesi, ove mai tali incrementi fossero avvenuti, sarebbe del tutto improbabile (forse impossibile) valutarne l'esistenza in modo significativo.

12) Si osserva nei risultati come gli effetti delle emissioni attribuite ad ENI siano proporzionalmente inferiori alle emissioni (stimate) rilasciate, a volte anche di 1 ordine di grandezza. La dipendenza non proporzionale degli effetti porta a poter suggerire che non vi sia una connessione diretta e proporzionale tra entità delle emissioni ed effetti e che sia potenzialmente discutibile il criterio secondo cui lo studio delle responsabilità climatiche debba essere condotto in base ad un potenziale ordine di priorità basato sulle quantità di emissioni (equivalenti), ma altri criteri devono essere

considerati, quali ad esempio il periodo storico e la sequenza delle emissioni stesse nel tempo ed in generale, lo specifico tipo di emissione ed il relativo potere climalterante.

1 Introduzione

Il presente documento costituisce la relazione preliminare dei risultati relativi all’incarico conferito allo scrivente da Legance, per il “Supporto Tecnico-Scientifico per attività di valutazione relativa al tema della *Source Attribution*”.

La genesi dell’incarico è qui brevemente riportata. ENI S.p.A. (“**ENI**” o la “**Società**”) ha conferito allo Studio Legance e a Dentons Europe Studio Legale Tributario, in qualità di *co-counsel*, l’incarico di assistenza e difesa nel giudizio di primo grado davanti al Tribunale di Roma – R.G. n. 26468/2023 – instaurato da ReCommon APS e Greenpeace Onlus (gli “**Attori**” o i “**Ricorrenti**”) contro ENI, nonché contro Cassa Depositi e Prestiti S.p.A. e il Ministero dell’Economia e delle Finanze (il “**Giudizio**” e l’“**Incarico Legance**”). Lo Studio Legance, su indicazione e in base agli accordi intercorsi con ENI, ha conferito allo scrivente un incarico per lo svolgimento di alcuni approfondimenti di natura tecnico/scientifica, rispetto a quanto addotto nell’atto di citazione.

Nell’ambito del Giudizio, vengono richiamati a sostegno delle tesi proposte, aspetti specifici connessi con le tematiche relative alla genesi dei cambiamenti climatici e, nello specifico (*e.g.* pag. 3 dell’Atto di citazione, l’“**Atto**”) relativamente al tema della “*Attribution Science*” cioè la scienza che consente di identificare:

“...i contributi relativi di differenti settori, attività ed entità al cambiamento climatico...”¹

Gli Attori citano altresì alcuni lavori di letteratura (*e.g.* pag. 43), atti a supportare le loro tesi.

Gli approfondimenti condotti nella presente relazione, si focalizzano quindi sul tema della “*Attribution Science*” e riguardano l’analisi di alcuni aspetti, così riassunti.

- 1) Inquadramento scientifico in tema di *Source Attribution*.
- 2) Modelli climatici e loro utilizzo per la *Source Attribution*.
- 3) Lavori di letteratura citati e *Source Attribution* verso *Oil&Gas*. Contenuti, discussione e utilizzo per i fini di *SA*.

Dunque, nella presente relazione si conduce un’analisi focalizzata su questi aspetti. *In primis*, si introduce il concetto di *Source Attribution*, che rispecchia in maniera più puntuale e specifica il concetto, più generale, di *Attribution Science*, utilizzato dagli Attori e rappresenta, a parere dello scrivente, il tema più rilevante per quanto riguarda i contenuti e tesi dell’Atto.

Si procede poi ad un inquadramento scientifico del tema della *Source Attribution*, in particolare se ne definiscono i contorni, scopi ed i più recenti sviluppi.

Si riportano poi i risultati di una indagine atta a stabilire quali metodologie sono disponibili in letteratura per gli scopi di *Source Attribution* ed in particolare, quali modelli matematici (*i.e.* modelli climatici e chimico-fisici) vengono utilizzati ed i relativi risultati.

Si focalizza poi l’analisi sui più recenti lavori di letteratura specificamente dedicati al tema della *Source Attribution* di Compagnie *Oil&Gas*, che rappresentano un sotto-insieme, per la verità limitato,

¹ “identifying the relative contributions of different sectors, activities, and entities to climate change.” Climate Attribution Database. <https://climateattribution.org/>

della letteratura in tema di *Source Attribution*. Nell'ambito di tale analisi, si commentano specificamente i lavori citati nell'Atto, di fatto ivi ricompresi.

Si descrive brevemente il contenuto di tali lavori, se ne discutono le ipotesi e limiti di applicabilità, in particolare ai fini della *Source Attribution*.

Infine, si propongono alcune considerazioni con riguardo alle risultanze del presente lavoro ed i rapporti con i temi del Giudizio.

2 Focus principale su *Source Attribution*

Il *focus* principale della presente analisi è rappresentato dal tema della *Source Attribution* ("SA").

Tale argomento nasce, di fatto come una delle branche (più recenti) del più generale tema/scienza della "*Climate Change Detection and Attribution science*", spesso indicata come *climate attribution* "CA" science, oppure *detection and attribution*, "*D&A science*", o solo *D&A*.

Tale disciplina, che può essere oramai considerata una branca delle scienze del clima e dell'ingegneria, congloba un ampio spettro di tematiche connesse alla relazione tra le variazioni/cambiamenti climatici attualmente osservabili ("*transient climate change*") e le cause antropiche che li determinano.

Convenzionalmente, in base a quanto osservato in letteratura, la scienza della *D&A* può essere organizzata secondo quattro differenti tematiche (e.g. *Climate Attribution Database*, <https://climateattribution.org/>):²

- 1) *Climate Change Attribution* CCA (Attribuzione del Cambiamento Climatico, ndr): *i.e.* lo studio di come la concentrazione crescente di gas serra in atmosfera impatta vari aspetti del sistema climatico, come le temperature medie globali, il livello dei mari e il ghiaccio marino.
- 2) *Extreme Event Attribution* EEA (Attribuzione degli Eventi Estremi, ndr), *i.e.* lo studio di come variazioni del clima in senso globale impattano la probabilità (di occorrenza, ndr) e le caratteristiche di eventi estremi.
- 3) *Impact Attribution* IA (Attribuzione degli impatti, ndr), *i.e.* lo studio di come le variazioni del clima in senso globale impattano globalmente/localmente sugli esseri umani e sugli ecosistemi.
- 4) *Source Attribution* SA (Attribuzione delle fonti/sorgenti, ndr), *i.e.* l'identificazione del contributo relativo di differenti settori, attività ed entità ai cambiamenti climatici.

² "*Climate Change Attribution: Examining how rising concentrations of heat-trapping gases in the atmosphere affect other aspects of the global climate system, such as global mean temperature, sea level, and sea ice*".
"*Extreme Event Attribution: Examining how changes in the global climate system affect the probability and "characteristics of extreme events*".
"*Impact Attribution: Examining how changes in the global climate system affect humans and ecosystems*".
"*Source Attribution: Identifying the relative contributions of different sectors, activities, and entities to climate change*".
<https://climateattribution.org/>.

Si osserva qui in prima istanza, come la dizione, utilizzata nell'Atto, di "*Attribution Science*", rimane vaga/indefinita rispetto a quanto qui riportato.

Dato il tema dell'Atto e le pubblicazioni ivi richiamate è tuttavia plausibile ipotizzare che con tale termine si intenda richiamare il concetto di "*Source Attribution*".

Vale la pena richiamare subito alcuni aspetti, ossia:

- 1) Tra i quattro aspetti riportati, i primi tre temi mostrano la presenza di una mole di lavori di letteratura di gran lunga maggiore rispetto al quarto tema, la *SA*, che si può a tutti gli effetti considerare ad uno stato seminale/embrionale.
- 2) L'analisi dei più recenti documenti forniti dal *panel* IPCC, ossia del rapporto di valutazione, *Assessment Report 6*, AR6, costruito sulla base di una imponente mole di letteratura, mostra come un elevato livello di confidenza/verosimiglianza si possa oramai attribuire alle conclusioni sul tema di 1) *climate change* (considerando anche gli eventi di tipo *slow-onset*, *i.e. trend* di lungo periodo e lento sviluppo, *e.g.* l'andamento delle temperature medie) e 2) *extreme events*, tuttavia con la mediazione di meccanismi di attribuzione parziale del rischio (FAR, *fraction of attributable risk*). Un livello lievemente più basso (ma sempre medio-alto) di confidenza/verosimiglianza si può attribuire al tema 3) *impact*, con notevole incertezza alla scala locale e con una rilevante interazione con i meccanismi di uso e gestione del territorio.
- 3) Contrariamente, i *report* IPCC più recenti (AR5/6), sembrano mostrare una scarsa evidenza di studi conclusivi in relazione al tema della *SA*, specialmente se confrontati con i temi 1-3. E' possibile, dato il lungo periodo richiesto per la preparazione di tali *report* (5-6 anni in media tra due *report* successivi), che lavori editi nei 2-3 anni precedenti la pubblicazione possano mancare. Tuttavia, tale aspetto rimanda alla conclusione che ancora sul tema della *SA* non vi siano evidenze cogenti.
- 4) Rispetto al tema dell'identificazione del contributo relativo di differenti settori, attività ed entità ai cambiamenti climatici, i primi tre temi non sembrano (largamente) rilevanti, poiché generalmente non si occupano di legare specifiche fonti di emissione (*Sources of Emission*, SOE) ad eventi specifici (*slow-onset*, o *extreme events*), o a impatti globali/locali.

Il tema 4, *SA* è quindi di specifico interesse qui, poiché si occupa di identificare un legame specifico tra eventi climatici a vario titolo e specifiche sorgenti emissive SOE, stabilendo connessioni spazio-temporali ben definite.

In base all'analisi preliminare qui condotta, si può ragionevolmente collocare la concezione e lo sviluppo della *SA* all'ultimo decennio circa (ca. coincidente con il lavoro di Heede, 2014a). Da allora, si osserva in letteratura la comparsa di alcuni lavori in tema di *SA*, con varie finalità e metodologie.

I lavori di letteratura specificamente dedicati al tema della *Source Attribution* rispetto a Compagnie *Oil&Gas* sono comunque in numero limitato e come detto nell'ambito di tali lavori, sono ricompresi i lavori citati nell'Atto.

Tutto ciò considerato, il seguito del qui presente lavoro, si focalizza sulla tematica della *SA*, prima con un'analisi generale e poi con un *focus* specifico sulle compagnie *Oil&Gas*.

Rispetto ai temi della *Extreme Events Attribution* e della *Impact Attribution*, lo scrivente fornirà poi alcune brevi considerazioni utili all'inquadramento del tema in particolare in relazione al contenuto dell'Atto di Citazione. Tali argomenti, come detto più ampiamente studiati e commentati nell'ambito

dei lavori di IPCC, e.g. in AR6, mostrano alcuni aspetti di interesse per i temi della causa, che vengono brevemente riportati qui.

3 *Source Attribution, SA, inquadramento scientifico.*

3.1 *Genesi della SA, la Proposta Brasiliana*

La genesi del tema della *Source Attribution*, che, come detto vede uno sviluppo scientifico abbastanza recente, si può verosimilmente tracciare alla cosiddetta “Proposta Brasiliana” (*Brazilian Proposal, BP*, Filho and Miguez, 1998; La Rovere et al., 2002), avanzata durante la negoziazione per il protocollo di Kyoto. La proposta ipotizzava la necessità/pertinenza di una metodologia per collegare/quantificare il contributo dei Paesi (Parties) Annex I (*i.e.* Paesi afferenti all’OCSE e Paesi con economie in transizione) alla riduzione di emissioni, con il contributo relativo di tali Paesi alla crescita della temperatura media globale (Den Elzen, and Schaeffer, 2002). A partire da quell’anno, nella scia della proposta, i ricercatori hanno provato a valutare alcuni metodi atti a porre la basi per:

- i) Una modellazione affidabile del legame tra sorgenti specifiche di emissione SOE e (crescita del) effetto serra.
- ii) L’attribuzione affidabile delle condizioni del clima presente a (specifiche) SOE, in particolare considerando la complessità delle interazioni e retro-azioni (*feedback*) climatiche e soprattutto il tema della non-linearità della risposta climatica rispetto a percorsi emissivi modulati nel tempo in maniera complessa (Trudinger, and Enting, 2005).

In tal senso, sembra possibile assimilare quanto richiesto dalla Proposta Brasiliana *BP*, con il concetto della *SA* qui considerato, con il *caveat* che tale proposta, nella sua genesi sembrava (e sembra) indirizzata verso una analisi di contributi/responsabilità degli stati, ma non di enti di diritto privato, o settori specifici.

3.2 *Perimetro della SA e strumenti necessari*

Il perimetro della *SA* come fin qui definito si può quindi ricondurre all’opzione di valutare “il contributo relativo di differenti settori, attività ed entità ai cambiamenti climatici”. Tale perimetro può includere, *i.e.* i) le variabili *target*, ii) i metodi utilizzati, iii) gli emettitori *target*, iv) gli scopi di utilizzo. Il perimetro di tale tipo di analisi, tuttavia non sembra a chi scrive definito con esattezza ad oggi (anche in ragione, come già detto, della relativamente recente introduzione di questa tematica). E’ però possibile delineare alcune tendenze, deducibili dalla letteratura di settore.

L’analisi preliminare finora condotta, pur mostrando una notevole complessità, ha già permesso di evidenziare alcune tematiche comuni ed alcuni tratti tipici, emersi nell’affrontare l’esercizio della *SA* con il significato sopra riportato (*e.g.* Skeie et al., 2017).

Da un lato, vengono affrontati diversi fenomeni, ad esempio diversi aspetti fisici del clima, e vengono quindi considerate diverse variabili (ad esempio precipitazioni, temperatura, ecc.), come detto.

Dall’altro lato, vengono considerate diverse scale (spaziali) di attribuzione. L’attribuzione può essere condotta partendo da una scala globale (l’intera terra), fino a una scala (molto) locale, ad esempio per una determinata regione, paese o persino città o villaggio. Si cerca qui di attribuire i cambiamenti

climatici, osservati o modellati a quella scala, alle emissioni di settori specifici, regioni e persino società/entità specifiche. Tali scale/livelli diversi si traducono chiaramente in un diverso livello di verosimiglianza/incertezza dei risultati. Inoltre, vengono esplorate scale temporali e spaziali di attribuzione, incluso lo studio delle emissioni/clima del passato (nel lontano passato usando serie lunghe di dati/simulazioni), presente (cioè con l'uso di serie del passato prossimo, incluso oggi, o anche con proiezioni molto vicine nel futuro), o futuro (cioè con proiezioni sull'orizzonte di metà secolo e/o oltre), di nuovo con verosimiglianza e significatività ampiamente diverse.

Riguardo alle variabili *target*, si osserva che l'approccio di tipo *SA* può teoricamente essere applicato a varie tipologie di grandezze, fisico-chimiche, sia dal punto di vista delle forzanti, sia dal punto di vista delle grandezze climatiche.

Dal punto di vista delle forzanti, mentre la variabile più investigata è la concentrazione di CO₂ (e/o la CO₂ equivalente, tipicamente, ma non solo, con l'aggiunta di CH₄ e N₂O), altri composti possono essere investigati in maniera specifica (NO_x, SO_x, *aerosol* da combustione, composti organici volatili VOCs, *black carbon*, PM2.5/5/10, etc..).

Le variabili chimico-fisiche di interesse sono svariate e in linea di principio si tratta di tutte le variabili simulate dai modelli di circolazione atmosferica. Prime fra tutte le temperature, spesso ricavate tramite il calcolo della forzante radiativa *F*. Ad esse si possono aggiungere, il calcolo della precipitazione, del regime dei venti, del livello marino, del livello di acidità marina pH e svariate altre grandezze (condensate poi in indici statistici).

Riguardo i metodi/approcci utilizzati, in linea del tutto generale ed indipendentemente dalle variabili *target* specifiche, si può dire che l'esercizio di *SA* richiede due ingredienti fondamentali:

- 1) Un modello della risposta atmosferica alle emissioni, *i.e.* un modello atto a simulare il “cambiamento climatico” in qualche modo espresso, in funzione della modificata (accresciuta) presenza di CO₂ (anche equivalente CO_{2e}) nell'atmosfera stessa.
- 2) Un metodo/procedura per la valutazione della *SA*, ossia un approccio che consenta di valutare, in maniera possibilmente robusta, l'effetto delle emissioni derivanti da uno specifico settore/emittitore/regione su una o più variabili chimico fisiche.

Su questi due aspetti, si elaborerà appena più avanti.

Riguardo gli emittitori *target*, vi sono applicazioni in letteratura relative a differenti situazioni. Come detto in precedenza, la genesi del tema dalla *SA*, verosimilmente legato alla cosiddetta “Proposta Brasiliana”, punterebbe verso una applicazione atta a collegare/quantificare il contributo di singoli paesi, regioni, o classi/settori di emittitori. Tuttavia, in letteratura è possibile evidenziare studi riferiti a singole entità, o persino singole sorgenti puntuali di emissione.

L'utilizzo dei risultati della *SA* è in generale potenzialmente molto ampio, ma è chiaramente qui di interesse riferirsi al tema specifico delle emissioni da compagnie (e spec. *Oil&Gas*).

In tal senso, ad esempio, Heede (2014b) suggerisce che lo scopo di tale tipo di analisi (lì, la valutazione di quote emissive) sia quella di “*comprendere le emissioni storiche come una materia fattuale e di facilitare la considerazione della loro rilevanza per le politiche pubbliche*”³.

³ “*The purpose of the analysis is to understand the historic emissions as a factual matter, and to invite consideration of their possible relevance to public policy*”. Heede (2014b).

Secondo Ekwurzel et al. (2017) “L’entità del contributo (degli emettitori, ndr) calcolato in questo studio, è un fattore da considerare nella valutazione di responsabilità sulle conseguenze dei cambiamenti climatici, associate alla CO₂ atmosferica ed al CH₄, alla forzante radiativa, GMST e GSL. Altri fattori includono la valutazione delle differenze tra i produttori di carbonio, nel modo in cui hanno risposto alle prove scientifiche dei rischi climatici connessi ai loro prodotti....Questi fattori, accoppiati con considerazioni etiche, legali e storiche possono ulteriormente supportare la discussione sulle responsabilità dei produttori di carbonio nel contribuire a limitare i cambiamenti climatici, attraverso investimenti nella mitigazione, sostegno all’adattamento e risarcimento dei danni climatici⁴”.

3.3 Complessità nell’attribuzione ed effetti non-lineari

Una prima problematica da sollevare, nell’ambito dell’esercizio di attribuzione del tipo SA, è la risposta non lineare del sistema terra-atmosfera, che non consente in alcun modo di ipotizzare una relazione lineare tra gli input emissivi, in valore assoluto e/o percentuale e la relativa risposta in termini climatici (e.g. Trudinger, and Enting, 2005; Ekwurzel et al. 2017; Skeie et al., 2017).

Nel loro lavoro del 2005, Cathy Trudinger e Ian Enting discutono in maniera approfondita la tematica della attribuzione puntuale degli effetti del cambiamento climatico, con specifico *focus* sulla Proposta Brasiliana, BP.

Il tema principale è proprio l’esistenza di comportamenti e risposte non lineari del sistema climatico all’introduzione di emissioni nel sistema stesso.

Il riferimento dello studio è sull’attribuzione a livello di nazione (come previsto dalla PB), ma i ragionamenti condotti sono del tutto equivalenti per l’attribuzione a qualunque tipologia di ente.

L’*Abstract* del documento riporta chiaramente che:

“Modelli di tipo numerico vengono utilizzati per calcolare la crescita della temperatura (e altre variabili, ndr) dovuta a emissioni passate di gas serra e per ripartire il (le responsabilità del, ndr) riscaldamento tra nazioni o gruppi di nazioni. Quando i modelli utilizzati includono delle non linearità ci sono differenti approcci che possono essere utilizzati per ripartire il riscaldamento in contributi regionali o nazionali, che forniscono risultati differenti.”⁵

Tale prima constatazione indica immediatamente come i risultati di un’analisi di tipo SA, come intesa nella presente letteratura, porti verosimilmente a risultati dipendenti dalle ipotesi di base e dalle scelte strategiche.

⁴ “Size of contribution, such as calculated in this study, is one factor to consider in assessing responsibility for climate change consequences associated with atmospheric CO₂ and CH₄, radiative forcing, GMST, and GSL. Other factors include consideration of differences among carbon producers in how they responded to the scientific evidence of the climate risks of their products (Frumhoff et al. 2015). These factors coupled with ethical, legal, and historical considerations may further inform discussions about carbon producer responsibilities to contribute to limiting climate change through investment in mitigation, support for adaptation, and compensation for climate damages.” Heede (2014b).

⁵ “Numerical models are used to calculate the temperature increase due to past emissions of greenhouse gases, and to partition the warming among nations or groups of nations. When non-linearities are included in the models, there are different approaches that can be used to partition global warming into regional or national contributions, and the methods give different results” Trudinger e Enting (2005). Abstract.

Tanto nell'ottica di una modellazione complessa, e.g. tramite modelli climatici di tipo ESMs (*Earth System Models*, che simulano il sistema terra tramite la soluzione numerica delle equazioni della dinamica su una griglia tridimensionale completa) o EMICS (*Earth system Models of Intermediate Complexity*, che simulano il comportamento dell'atmosfera tramite ipotesi e schemi semplificati) (Joss et al., 2013), quanto in una semplice schematizzazione delle dinamiche atmosferiche della CO₂ con modelli "concettuali", o di risposta all'impulso (AR5-IR, FAIR, Millar et al., 2016) e considerando la variabile climatica più strettamente connessa alla dinamica della CO₂, la temperatura (globale), si possono evidenziare alcuni effetti non lineari (NL-) principali, quali ad esempio:

- 1) *NL-CO₂*. A parità di tasso di emissioni in atmosfera, E (GtC/anno), l'incremento delle concentrazioni di CO₂ (ppm) in atmosfera aumenta più che linearmente all'aumentare delle concentrazioni iniziali, per via della saturazione dei "serbatoi ambientali" di carbonio (e.g. Equazione 1 più avanti).
- 2) *NL-F*. L'incremento della forzante radiativa F (W/m²) associata in risposta ad un incremento della concentrazione di CO₂ diviene proporzionalmente minore all'aumentare della CO₂ stessa, per via di una saturazione nelle bande di assorbimento (e.g. Equazione 3 più avanti).
- 3) *NL-T*. L'incremento termico ΔT (°C) dipende in maniera non lineare dalla forzante radiativa associata (e.g. Equazione 4 più avanti) e dalla temperatura T stessa.

Il risultato di tali passaggi è quindi una complessa dipendenza della risposta (termica) alla introduzione in atmosfera di emissioni, in particolare, in dipendenza dallo stato termico, atmosferico e dell'accumulo di carbonio iniziale.

Tale circostanza fa sì che l'effetto di un incremento marginale di emissioni *target* (da parte di un emettitore), abbia effetti differenti in relazione i) allo stato iniziale del sistema e, da un punto di vista temporale, ii) al cumulato ed alla dinamica temporale delle emissioni *target*. Tali aspetti influenzano in modo evidente l'esercizio di *SA*.

In alcune circostanze, o sotto particolari ipotesi, alcuni autori hanno proposto l'utilizzo di legami/funzioni lineari/linearizzate per modellare le relazioni di cui sopra (o per altre variabili, e.g. il livello Marino, Kopp et al., 2016), per modellare in maniera più rapida le evoluzioni del sistema terrestre in risposta a scenari emissivi, oppure allo scopo di condurre l'esercizio di *SA*. E' tuttavia chiaro che tali semplificazioni hanno un valore puramente indicativo e, tipicamente su valori delle variabili a grande scale, o globali, mentre poco dicono delle dinamiche localizzate.

Nel seguito si mostreranno alcuni risultati atti a illustrare l'effetto di tali scelte sull'esercizio di *SA*.

3.4 Modellistica climatica per la SA

In linea di massima, l'esercizio di *SA* deve essere condotto tramite l'utilizzo di un modello, composto verosimilmente da componenti modellistiche accoppiate, che consideri:

- 1) Il ciclo del carbonio, per legare le emissioni all'assorbimento/*uptake* all'interno dei sistemi ambientali ed alle concentrazioni in atmosfera.
- 2) La risposta/forzante radiativa dell'atmosfera in funzione dei livelli di concentrazione dei gas climalteranti/serra.

- 3) La dinamica/variazione delle grandezze fisiche connesse, prima fra tutte la temperatura, ma anche diverse altre variabili, quali le precipitazioni (liquide/solide), il regime dei venti, il livello marino etc.

Una discussione completa sulla disponibilità ed utilizzo di modelli climatici, anche per gli scopi di SA richiederebbe uno sforzo non compatibile con le finalità della presente relazione. Qui ci si limita a riportare una breve analisi del problema, utile alla lettura e comprensione del documento.

Una classificazione del tutto generale e sommaria può essere tentata, utilizzando tre macro-categorie di modelli, ossia:

- 1) Modelli climatici di tipo ESMs (*Earth System Models*, che simulano il sistema terra tramite la soluzione numerica delle equazioni della dinamica su una griglia tridimensionale completa, quali ad esempio i modelli GCMs). Tali modelli vengono tipicamente utilizzati per la realizzazione di scenari complessi ed affidabili, quali ad esempio gli scenari CMIP6 di IPCC A6 (e analogamente per i precedenti ARs). Tali modelli, data l'alta risoluzione spazio-temporale (con griglie 3D, tipicamente nell'ordine dei $10 \times 10 \times 1 \text{ km}^3$, o similari, con intervalli temporali di simulazione dell'ordine di poche ore) e l'enorme numero di equazioni e variabili coinvolte possono essere utilizzati solo per poche simulazioni mirate, tipicamente con scenari emissivi di riferimento (e.g. SSP2.6-8.5).
- 2) EMICS (*Earth system Models of Intermediate Complexity*), che simulano il comportamento dell'atmosfera tramite ipotesi e schemi semplificati e a risoluzioni più grossolane (griglia al suolo di $1000 \times 1000 \text{ km}^2$, mediata sulla verticale, risoluzione giornaliera). Dati i tempi di calcolo più rapidi, tali modelli possono includere componenti del sistema terra-atmosfera associati con *feed-back* di lungo periodo (e.g. Weber, 2010).
- 3) Modelli di tipo risposta all'impulso IRMs, di tipo concentrato, *lumped* e "concettuale" (e.g. modelli a "serbatoio", AR5-IR, o FAIR, Millar et al., 2016), utili a simulazioni rapide, relative a valori mediati sull'intero sistema terra-atmosfera (e.g. temperatura media terrestre GMST).

Riguardo all'esercizio di attribuzione più specifico qui di interesse, ossia la valutazione su periodi lunghi (ca. 1850- presente, o almeno 1980-presente) i metodi utilizzati al momento sono in sostanza riconducibili all'approccio semplificato, di tipo Risposta all'impulso, *impulse response models IRMs*.

Rispetto alla classificazione relativa alle scale spaziali e temporali, è possibile dire, in sostanza, che tali metodi sono da considerarsi concentrati (*lumped*), ossia considerano valori delle variabili integrate (medie) sul sistema terrestre e, per lo più lavorano alla scala annuale (tipicamente, la scala di aggregazione delle emissioni da *Oil&Gas* e altre tipologie di entità). Dal punto di vista della fisica, tali modelli si possono classificare come concettuali, poiché utilizzano appunto elementi concettuali, quali dei serbatoi, lineari o non lineari, per descrivere il comportamento del sistema terra nell'accumulo della CO_2 .

Tali modelli sono altresì *data driven*, poiché i parametri del modello devono essere valutati sulla base di una procedura di calibrazione tramite l'utilizzo di dati osservativi.

Si noti che valori guida di alcuni di tali parametri possono essere identificati, per esempio nell'ambito dei lavori di IPCC, alcuni dei quali specificamente indirizzati ad esplorare i *range* di risposta/sensibilità ai parametri modellistici, di modelli di tipo ESM (e.g. General Circulation Models, GCMs) o EMICS (e.g. Joos et al., 2013, Millar et al., 2016).

Una calibrazione ed una analisi di sensitività sono comunque sempre necessarie (e.g. Ekwurzel, 2017; Licker, 2019).

Qui (i.e. con modelli di tipo *IRMs*), le variabili *target* (medie terrestri) finora maggiormente studiate tramite tali modelli di tipo *IRM* includono le concentrazioni di CO₂ e temperatura media (GMST), spesso ricavata tramite calcolo della forzante radiativa *F*. Ad esse si possono aggiungere, tramite utilizzo di ulteriori modelli (iper)semplificati, il calcolo del livello (medio) marino GSL e del livello di acidità pH (medio, o per regioni) marino.

Si osservi come in qualche caso (e.g. Licker, 2019) gli *output* concentrati (spazialmente) vengano utilizzati come *input* per modelli spazialmente distribuiti, per il calcolo di variabili specifiche.

Un'analisi di maggior dettaglio del funzionamento di tali modelli e della relativa affidabilità/incertezza sarà condotta nel seguito, in particolare con *focus* sul modello FAIR, utilizzato nella letteratura recente per l'esercizio di attribuzione, *SA*.

3.5 Metodologie per la SA

Trudinger e Enting (2005) propongono nel loro articolo sette differenti possibili approcci/metodi per l'esercizio di valutazione della *SA*, proponendo esempi di applicazione di tipo *SA* (emissioni-temperatura) tramite una modello semplificato di risposta atmosferica e termica alle emissioni (CO₂, *F*, *T*). I metodi vengono schematizzati illustrando la scomposizione dell'effetto $Eff = f(A+B)$ dato tramite una funzione *f* (variabile climatica) risultante dalla somma di una causa (emettitore) A più una causa (emettitore) B.

- 1) *NM Marginal attribution, Attribuzione marginale*. L'effetto delle cause (emettitori) A/B viene calcolato tramite la variazione nella funzione $\Delta Eff = \Delta Eff(A) + \Delta Eff(B)$, ottenuta tramite proiezione lungo la tangente Eff' , calcolata nel punto $Eff(A+B)$. Il rapporto $\Delta Eff(A)/\Delta Eff(B)$ fornisce il peso relativo delle due cause.
- 2) *NR Residual attribution (all but one, leave one out), Attribuzione residuale*. Il metodo consiste nel ricalcolare modellisticamente la funzione Eff escludendo di volta in volta uno degli emettitori. Ad esempio, in Figura 1, sottraendo B, si ottiene l'effetto di B condizionato (|) ad A (cioè considerando tutte le emissioni restanti, meno quelle di B), come $Eff(B|A) = Eff(A+B) - Eff(A)$. Risulta ovvio che secondo tale metodo, l'effetto attribuito a B dipende dal punto di partenza della funzione $Eff(A)$ calcolato in A.
- 3) *P Proportional attribution, Attribuzione proporzionale*. Questo metodo chiaramente ripartisce gli effetti in maniera lineare, come $Eff(A,B) = (A,B) \cdot Eff(A+B)/(A+B)$, ossia l'effetto del valore emissivo di un emettitore A,B è pari al valore emissivo di A,B moltiplicato per il rapporto numerico tra l'effetto totale del valore totale emissivo A+B, i.e. $Eff(A+B)$ ed il valore emissivo totale stesso (A+B).
- 4) *D Differential attribution, Attribuzione differenziale*. Questo metodo attribuisce variazioni nella funzione Eff , in relazione a variazioni locali della causa A, B, ossia tramite l'utilizzo di derivate locali. Tale metodo risulta di difficile applicazione, ma è di interesse in quanto aiuta ad evitare l'attribuzione delle conseguenze di emissioni "antiche" ad emettitori più recenti. Tuttavia, tale risultato può essere ottenuto con il metodo detto *time sliced*.

- 5) *TS Time sliced attribution, Attribuzione a tempi separati*. Benché apparentemente complicato, questo metodo si basa su di un presupposto semplice (Figura 2). L'idea è di attribuire l'effetto di lungo termine di un *batch* emissioni avvenute in un certo intervallo di tempo, differenziando (sottraendo) nel tempo le risposte temporali modellistiche date dalle risposte di lungo periodo a due funzioni di emissione, differenziate solo dall'emissione *batch* $\Delta F_t (\Delta E) = F_t (E_t (0 \approx t' - 1)) - F_t (E_t (0 \approx t'))$, dove $\Delta E = E_t (t') - E_t (t' - 1)$.
- 6) *GTO Global turnover attribution, Attribuzione rovesciata*. Il metodo ipotizza di ripartire le concentrazioni, separando l'assorbimento/*uptake* e le emissioni in due campi separati e di riscalarne poi il termine di assorbimento/*uptake* in base al contributo dei vari emettitori. Tramite questo approccio, poco utilizzato, si può far decrescere più rapidamente il peso di emissioni più "antiche" e considerare maggiormente emissioni "recenti".
- 7) *CR Cumulative emission attribution. Attribuzione cumulativa*. Questo metodo ipotizza di ripartire gli incrementi termici in relazione all'entità delle emissioni, fornendo un'equazione tipo $\Delta T(A|B) = \Delta T(A+B) \cdot \Delta E(A) / \Delta E(A+B)$. Si osservi che l'attribuzione ad un dato emettitore (A) è condizionata alla presenza dell'altro emettitore (B), e/o dal valore totale delle emissioni.

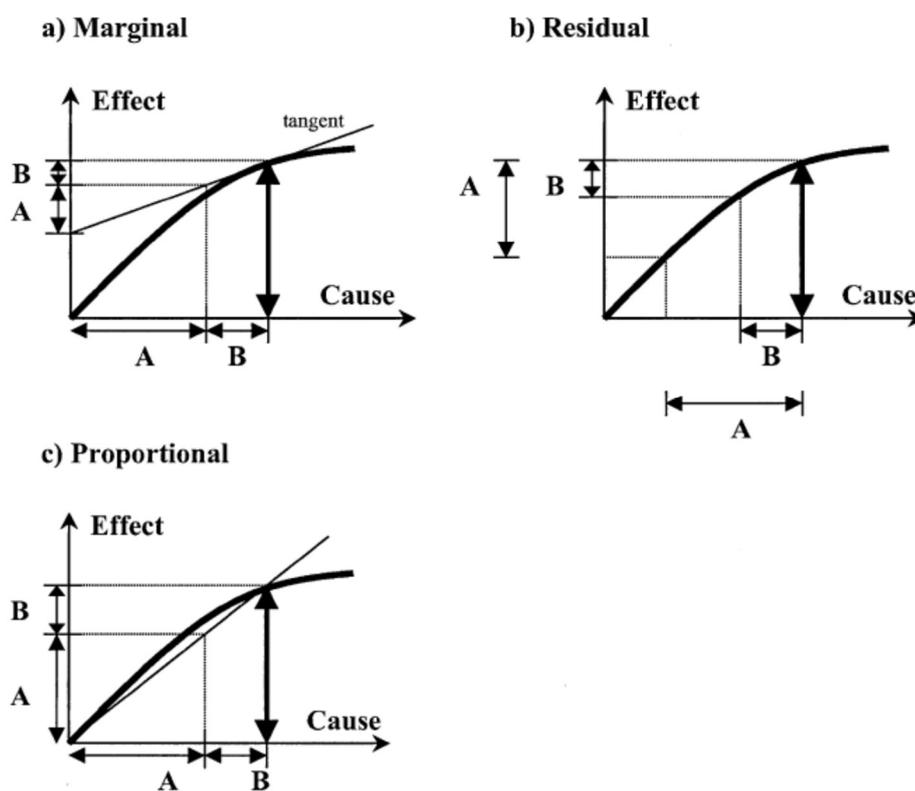


Figura 1 Illustrazione dei metodi Marginale, Residuale e Proporzionale. Relazione schematica di una relazione non lineare tra causa ed effetto, che illustra l'attribuzione per le regioni (cause emissive, ndr) A e B con i tre metodi detti. In: Trudinger e Enting (2005).

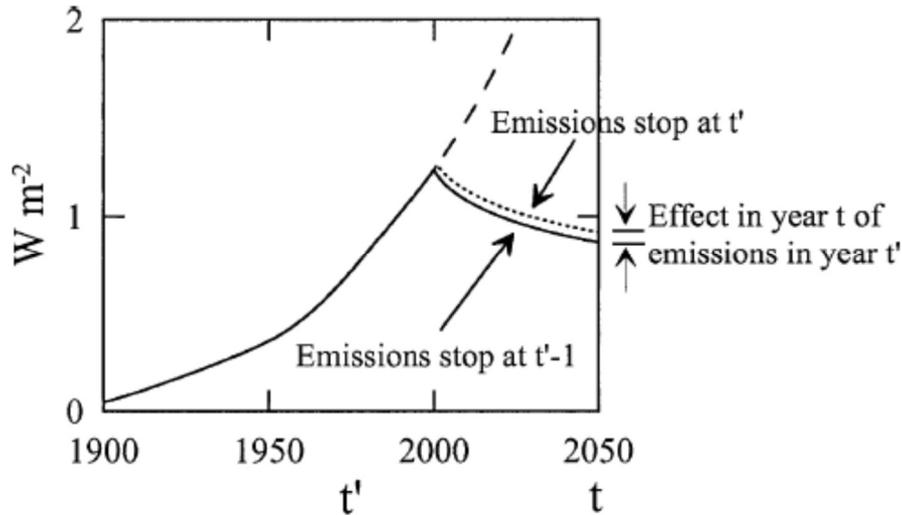


Figura 2 Attribuzione di tipo time-sliced. Esempio di due funzioni (forzante radiativa in W/m^2), una dovuta alle emissioni rilasciate fino al tempo $t'-1$ e zero in seguito (linea solida), l'altra dovuta ad uno scenario di emissione fino al tempo t' e poi zero (linea puntinata). Queste curve sono $F(t, t'-1)$ (solida) e $F(t, t')$ (puntinata). La differenza tra le due curve al tempo t è l'effetto al tempo t delle emissioni al tempo t' . La linea tratteggiata mostra $F(t, t)$. In: Trudinger e Enting (2005).

Trudinger e Enting (2005) mostrano alcuni esempi di applicazione dei vari metodi, utilizzando come default gli scenari emissivi EDGAR-HYDE 1.4 (1890-1990) e gli scenari futuri da SRES A2 (Figura 3). Alcuni risultati sono qui riportati nelle Figura 4 e Figura 5.

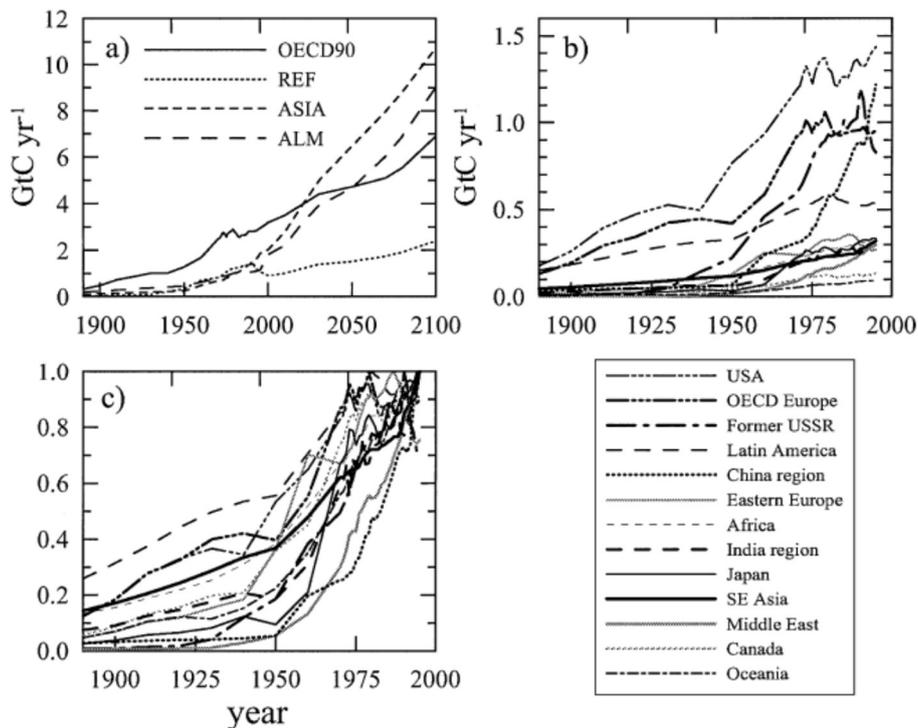


Figura 3 (a) Scenari emissivi EDGAR-HYDE 1.4 CO₂ emission database (1890-1990) e scenari futuri da SRES A2. (b) Scenari EDGAR-HYDE 1.4 per 13 gruppi. (c) Scenari EDGAR-HYDE 1.4 in 13 gruppi, normalizzati rispetto al massimo valore. REF è Europa dell'Est, Ex Unione Sovietica, ALM, Africa, America Latina, Medio Oriente. In: Trudinger e Enting (2005).

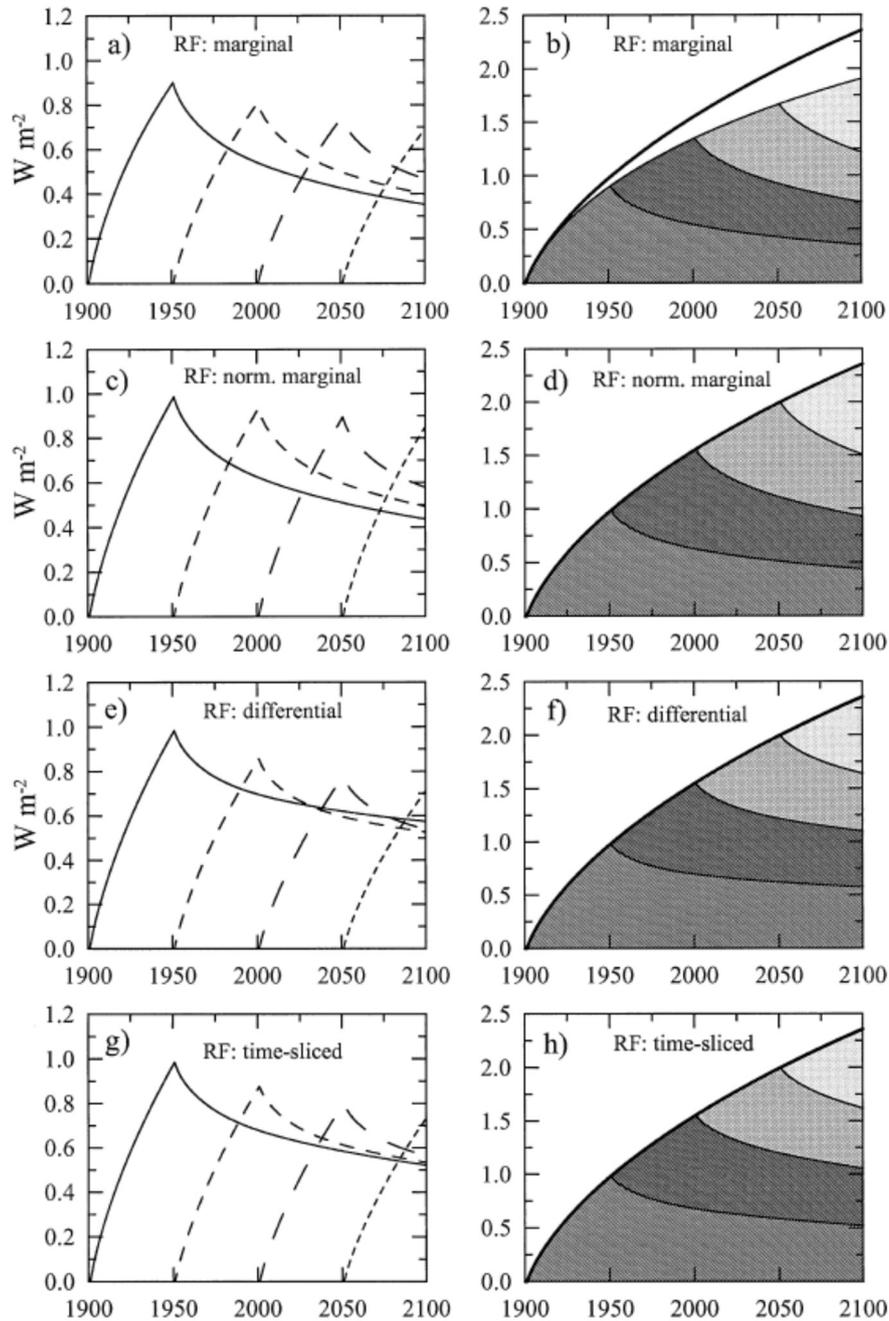


Figura 4 Forzante radiativa dovuta a CO_2 per il caso di emissioni costanti da quattro emettitori (regioni) per 50 anni, non sovrapposte. A sinistra, sono rappresentati i valori delle forzanti radiative per ogni regione. A destra, sono rappresentate le forzanti radiative cumulate (si osservino le differenti scale dell'asse y nelle figure di sinistra e di destra). La separazione viene condotta con il metodo Marginale, Marginale Normalizzato, Differenziale e Time Sliced. Il modello di CO_2 è lineare. La linea intera spessa nei grafici cumulativi indica il valore globale. In: Trudinger e Enting (2005).

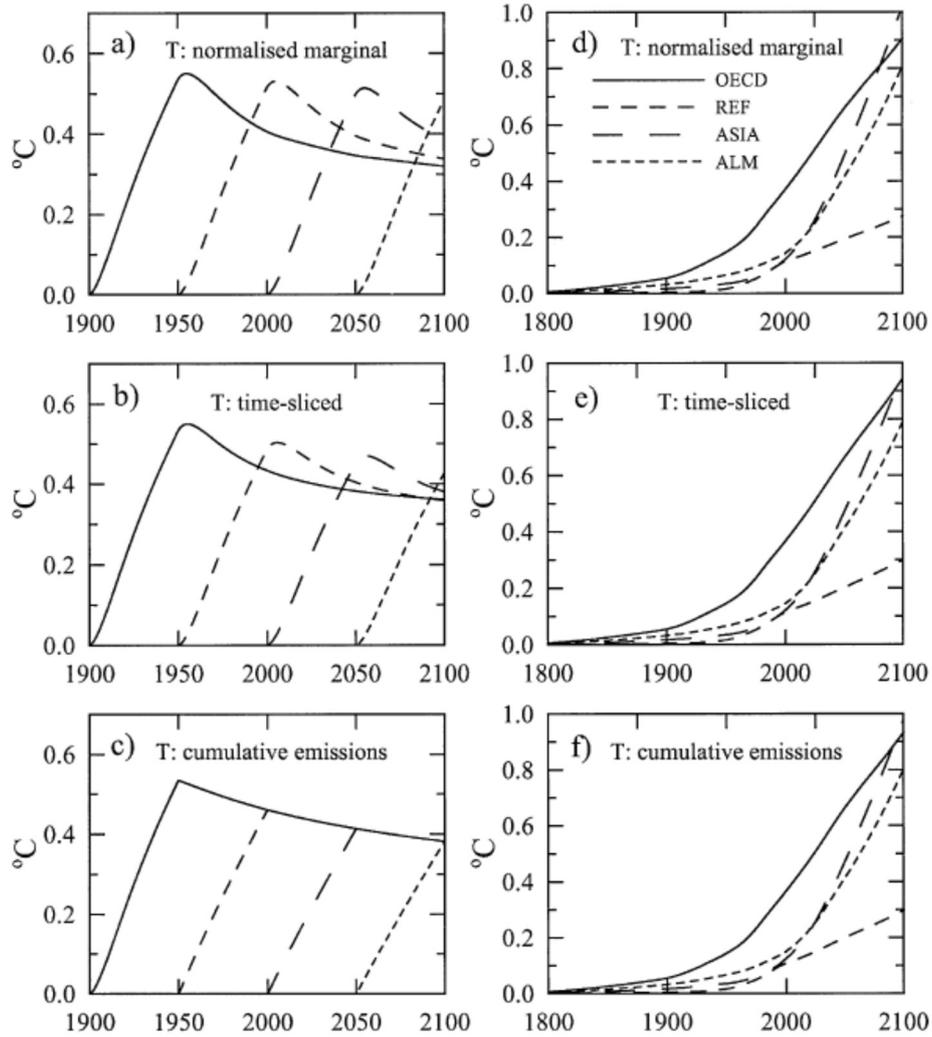


Figura 5 A sinistra, temperatura dovuta a CO₂ per il caso di emissioni costanti da quattro emettitori (regioni) per 50 anni, non sovrapposte. A destra, temperature ottenute con emissioni CO₂ da EDGAR-HYDE 1.4 e SRES A2 (si osservino le differenti scale dell'asse y nelle figure di sinistra e di destra). Si sono utilizzati modelli di concentrazione e forzante radiativa non lineare, il modello di temperatura è lineare. La separazione viene condotta con i metodi Marginale Normalizzato, Time Sliced e Cumulative Emissions.

Gli autori propongono un ranking dei modelli, sulla base di alcuni attributi proposti. I risultati sono qui forniti in Figura 6.

Criteria	NM	NR	P	D	TS	GTO	CR
1. Understandable	✓	✓	✓	?	✓	✓	✓
2. No paradoxical behaviour	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓
3. Equiv. to simple linear	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
4. $\sum_j X_j(t) = X(t)$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
5. Additive in space & time	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓
6. Applicable to general case	✓	✓	×	?	✓	✓	✓
7. Along causal chain	✓	✓	×	?	✓	×	×
8. Alternative model forms equiv.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
9. In/Dependent of future scenario	D	D	D	D	I	D	D

Figura 6 Analisi dei metodi di SA proposti in base ad alcuni attributi proposti. In: Trudinger e Enting (2005).

In sintesi, gli autori suggeriscono che:

- 1) I metodi più adatti all'attribuzione lungo la catena causale E-CO₂-F-T sono il metodo *normalised marginal NM* e *time sliced TS*. Questo vale sia per ipotesi (parzialmente) lineare e non lineare per tutti i modelli. La differenza maggiore tra i due è legata al trattamento delle emissioni recenti, o passate. Il metodo *TS* pesa maggiormente le emissioni recenti, rispetto al metodo *NM*.
- 2) Gli altri metodi non sembrano adatti per vari motivi, spiegati dagli autori.
- 3) Il metodo *normalised residual (all but one, leave one out)*, spesso utilizzato in letteratura, non è additivo, ossia non rispetta il criterio transitivo, secondo il quale l'effetto dato dalla somma delle emissioni di due emettitori (regioni) deve essere pari all'effetto dato dalle emissioni date dall'emettitore equivalente alla somma dei due, $Eff(A+B) = Eff(A) + Eff(B)$. Tale carenza rende altresì impossibile con questo metodo valutare il contributo del singolo emettitore in maniera indipendente dagli altri. Questo metodo è stato utilizzato, e.g. da Ekwurzel et al. (2017) e Licker et al. (2019), come si vedrà in seguito.
- 4) Considerando solo legami di tipo lineare tra le variabili (eccetto per la forzante radiativa), il metodo proporzionale si può considerare relativamente buono. Tale metodo ha il vantaggio di fornire indicazioni di facile comunicazione, per esempio ai *policy makers*.

Gli autori conducono poi un esercizio di attribuzione relativo a due casi, *i.e.* i) in 4 macro-regioni, ii) in 13 regioni, utilizzando i differenti approcci, per il 1990 (EDGAR-HYDE 1.4) e 2100 (SRES A2).

I risultati mostrano che:

- 1) Le differenze tra diversi metodi sono di qualche percento (sulle 4 regioni), che possono divenire importanti, anche in dipendenza dall'uso che si vuol fare dei risultati.
- 2) Le differenze percentuali maggiori tra i metodi si osservano quando le emissioni delle regioni non sono sincrone, *i.e.* per quelle regioni con *timeline* emissiva più lontana da quella media.

Gli autori conducono poi un confronto finale con l'esperimento ACCC (*Assessment of Contributions to Climate Change*, 2nd Bracknell experts' meeting, si veda UNFCCC, 2002).

Gli autori (sulla base della Tabella IV, qui in Figura 7) mostrano come il *range* ottenuto dagli autori per la variazione delle temperature in risposta a variazioni di CO₂, CH₄, N₂O rappresenta circa un quinto (20%, ndr), del *range* ACCC per almeno due regioni, comportando quindi una incertezza minore.

Gli autori suggeriscono quindi che, sebbene la scelta del metodo di attribuzione sia solo uno dei diversi fattori che influenza l'esercizio della *SA*, tuttavia tale scelta influenza i risultati dell'esercizio e deve essere condotta con attenzione.

Region	ACCC(%)	Attribution methods only(%)
OECD90	39–47	41.6–43.4
REF	13–17	14.8–15.8
ASIA	22–29	22.2–22.7
ALM	14–21	20.3–21.3

Figura 7 Range di contributi stimati alla crescita delle temperature al 2000 per 4 macro-regioni, in risposta all'aumento di CO₂, CH₄, N₂O. La seconda colonna mostra il range delle variazioni stimate ACCC per differenti modelli, assunzioni e forzanti (UNFCCC, 2002), mentre la terza colonna mostra i risultati di questo studio. In: Trudinger e Enting (2005).

Gli autori infine sottolineano come i metodi applicati valgano per ogni tipo di composto gas serra, CO₂, CH₄, N₂O e ad altri attributi fisici (e.g. livello medio marino, come svolto in Ekwurzel et al., 2017, ndr).

3.6 Source Attribution nell'AR6 IPCC

L'analisi dei più recenti documenti forniti dal *panel* IPCC, ossia del rapporto di valutazione, *Assessment Report 6*, AR6, costruito sulla base di una imponente mole di letteratura, mostra come un elevato livello di confidenza/verosimiglianza si possa oramai attribuire alle conclusioni sul tema di 1) *climate change* (considerano anche gli eventi di tipo *slow-onset*, i.e. trend di lungo periodo e lento sviluppo, e.g. l'andamento delle temperature medie) e 2) *extreme events*, tuttavia con la mediazione di meccanismi di attribuzione parziale del rischio (FAR, *fraction of attributable risk*).

Un livello lievemente più basso (ma sempre medio-alto) di confidenza/verosimiglianza si può attribuire al tema 3) *impact*, con notevole incertezza alla scala locale e con una rilevante interazione con i meccanismi di uso e gestione del territorio.

Contrariamente, i *report* IPCC più recenti (AR5/6), sembrano mostrare una scarsa evidenza di studi e conclusi in relazione al tema della *SA*, specialmente se confrontati con i temi 1-3. E' possibile, dato il lungo periodo richiesto per la preparazione di tali *report* (5-6 anni in media tra due *report* successivi), che lavori editi nei 2-3 anni precedenti la pubblicazione possano mancare. Tuttavia, tale aspetto rimanda alla conclusione che ancora sul tema della *SA* non vi siano ancora evidenze cogenti.

Il tema della *Source Attribution* in effetti compare in maniera sostanzialmente episodica e non strutturata all'interno del *Report* AR6, con riferimento ad alcuni (pochi, anche proporzionalmente all'enorme base bibliografica contenuta nel *report*) lavori scientifici.

Si riporta qui, in Tabella 2 una breve disamina dei lavori commentati nel AR6, che mostrano pertinenza con il tema della *SA* come qui definito, ossia in relazione all'attribuzione a livello di paesi, entità, *company*, e/o *Oil&Gas*, per periodi di tempo rilevanti.

Cit.	Posizione	Macro-Tema e composti target	Entità
Skeie, R.B., et al., 2017: Perspective has a strong effect on the calculation of historical contributions to global warming. <i>Environ. Res. Lett.</i> , 12(2), 24022.	WGII, p.150	SA in base a tre approcci di conteggio emissivo: estrattivo, territoriale, consumo. CO ₂	Paesi
Matthews, H.D., 2016: Quantifying historical carbon and climate debts among nations. <i>Nat. Clim. Change</i> , 6(1), 60–64.	WGII, p.150	Valutazione di debiti di carbonio e climatici. CO ₂	Paesi
Undorf, S., et al., 2018: Detectable impact of local and remote Anthropogenic aerosols on the 20th century changes of West African and South Asian monsoon precipitation. <i>J. Geophys. Res. Atmos.</i> , 123(10), 4871–4889.	WGII, p.150	Effetti di emissioni <i>aerosol</i> su monzone asiatico.	Regioni
Frumhoff, P.C., R. Heede, and N. Oreskes, 2015: The climate responsibilities of industrial carbon producers. <i>Clim. Change</i> , 132(2), 157–171, doi:10.1007/s10584-015-1472-5.	WGIII, p. 1425	Responsabilità proporzionali dei maggiori emettitori per i cambiamenti climatici	<i>Oil&Gas-Cement Manif.</i>
Ekwurzel, B., Boneham, J., Dalton, M. W., Heede, R., Mera, R. J., Allen, M. R., & Frumhoff, P. C., 2017. The rise in global atmospheric CO ₂ , surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers. <i>Climatic Change</i> 144(4): 579-590.	WGIII, p. 1425	Responsabilità proporzionali dei maggiori emettitori per incrementi di CO ₂ , temperatura e livello marino.	<i>Oil&Gas-Cement Manif.</i>
Heede, R., 2014b. Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers, 1854–2010. <i>Climatic change</i> 122(1): 229-241.	WGIII, p. 1425	Responsabilità proporzionali dei maggiori emettitori per le emissioni in atmosfera.	<i>Oil&Gas-Cement Manif.</i>

Tabella 2 Alcuni lavori citati nell'ambito di IPCC AR6, pertinenti al tema SA relativo a paesi, entità, company.

Ad esempio, il lavoro Licker et al. (2019), citato dagli attori a sostegno delle proprie tesi a pag. 44 dell'Atto, non è citato nel testo dell'AR6.

4 Lavori di letteratura citati. Discussione e affidabilità.

4.1 *Source Attribution, compagnie Oil&Gas*

Si può di fatto assumere che il concetto di *Source Attribution* verso specifici emettitori *target* nasca a seguito del lavoro di Heede (2014b), che nella sezione *Discussion* del suo articolo introduce in sostanza il tema dell'applicazione del metodo della (*Source*) *Attribution* a specifiche entità, in particolare a compagnie *Oil&Gas*.

L'autore in sostanza ricorda come, nelle more della costituzione della *United Nation framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), avvenuta nel 1992, i paesi appartenenti all'Annex I avrebbero dovuto supportare la maggior parte dei costi (anche economici) della negoziazione internazionale, pagato i costi dell'adattamento per le nazioni più povere e guidato la lotta ai cambiamenti climatici, in base all'evidenza che tali paesi erano (sono) i più beneficiati dall'essere stati storicamente i maggiori emettitori. Tuttavia, tale approccio finora non ha portato alla riduzione delle emissioni di gas serra, GHG, mentre alcuni osservatori hanno ipotizzato che il processo di riduzione fosse sostanzialmente fermo (*ndr*, con riferimento al 2014, anno di pubblicazione del lavoro)⁶.

Heede (2014b) quindi suggerisce che i risultati della sua analisi possano condurre ad un metodo differente rispetto a quello suggerito dalla UNFCCC. per condurre l'attribuzione delle responsabilità.

In particolare, osserva Heede (2014b), i maggiori produttori di combustibili fossili non sono tutti localizzati in paesi Annex I. Infatti, alcuni produttori sono in paesi (Arabia Saudita, Iran, Cina, India, Venezuela, Mexico, Kuwait, Abu Dhabi, Algeria), che compaiono nella lista dei primi 20 produttori, pur non essendo paesi Annex I (Table 3 in Heede, 2014b) e, su 85 entità esistenti, 54 hanno sede in paesi Annex I, 31 in paesi non-Annex I.

Poiché queste *carbon majors* hanno ricevuto benefici considerevoli e così i paesi che le ospitano, sembra ragionevole, sempre secondo Heede (2014b), ipotizzare che tali *majors* abbiano una "motivazione etica" di aiutare nella gestione della instabilità climatica, tanto più che tali *majors* possiedono le risorse finanziarie e le capacità tecniche per contribuire a mitigazione ed adattamento climatico.

Nel suo lavoro, commentato a seguire, Heede (2014b) propone che i risultati del suo lavoro possano fornire una base per futuri sviluppi, relativamente al tema della attribuzione di responsabilità e della lotta ai cambiamenti climatici.

⁶ "Parties to the Framework Convention agreed in 1992 that Annex I nations would shoulder most of the burden of funding international negotiations, paying adaptation costs for the poorest nations, and taking the lead in combating climate change, on the basis of the argument that they had benefitted the most from being the largest historical emitters, and therefore had the greatest responsibility for addressing it. This regime has so far failed to reduce global GHG emissions ...and some observers have concluded that the process is at an impasse ...". Heede (2014) p. 235.

4.2 Heede et al. (2014a;2014b)

4.2.1 Metodi e risultati principali

Nell'Atto vengono menzionati, pur senza apparentemente allegare una citazione esplicita, due lavori scientifici ("articoli") di Heede (2014a; 2014b). Il lavoro 2014a tuttavia, non rappresenta un contributo indipendente, ma un *report* interno (*Carbon majors: accounting for carbon emissions 1854-2010. Methods & Results*), non sottoposto a *peer review* dell'istituto *Climate Accountability Institute* CAI (<https://climateaccountability.org/>), contenente in sostanza materiale utilizzato per il lavoro 2014b (e di fatto rientrante nel materiale supplementare per tale *report*).

Gli Attori (pag. 43) riportano come:

"Per venire a ENI, le sue emissioni cumulative di CO₂ e CH₄ nel periodo 1988-2015 ammontano allo 0.6% delle emissioni cumulate globali (Heede, 2014b)"

Il *report* di Heede (2014b) contiene i risultati di un ampio lavoro di catalogazione delle emissioni condotto dall'autore per conto del CAI.

Il lavoro di Heede (2014b), pubblicato sulla rivista *Climatic Change* e quindi sottoposto a *peer review*, risulta di fatto un contributo importante nell'ambito della scienza della SA ed ai fini del Giudizio, poiché i) alcuni lavori successivi utilizzano le stime di emissione ivi proposte, come basi per successive elaborazioni e per l'attribuzione ad alcune *Oil&Gas* delle variazioni di parametri climatici e ambientali (e.g. temperatura terrestre, livello medio marino) e ii) poiché i quattro lavori citati esplicitamente nell'Atto a sostegno della teoria dell'attribuzione di responsabilità ad ENI, dipendono tutti dalle ipotesi, dati raccolti ed elaborazioni condotte in questo lavoro.

Heede (2014b) propone in sostanza di ricostruire le emissioni storiche (1850-2010) conseguenti alla produzione di combustibili fossili e cemento da parte di 90 compagnie (*majors*), di cui 50 a guida privata (*leading investors owned*), 31 di proprietà statale (*state-owned*) e 9 a economia pianificata (*nation-state producers*).

Il procedimento seguito in Heede (2014b) si può riassumere per punti come segue:

- 1) Definizione di un livello minimo di produzione $Pr \geq 8$ milioni di tonnellate di carbonio per anno MtC/y. Per un totale di 90 entità identificate. Di queste, 56 sono produttori di petrolio e gas naturale, 37 di carbone e 7 di cemento, localizzate in 43 paesi.
- 2) Raccolta dei dati di produzione tramite *report* annuali disponibili pubblicamente.
- 3) Valutazione del contenuto di carbonio relativo alla produzione annuale di ogni singola entità analizzata utilizzando fattori di conversione (*carbon factors*) forniti da IPCC, le Nazioni Unite, la *International Energy Agency* (IEA) e la U.S. *Environmental Protection Agency* (EPA), così da quantificare le emissioni annuali tracciabili per ogni entità. Il periodo considerato si basa sulle registrazioni di produzione disponibili, con le informazioni più datate relative al 1854 e di lì fino al 2010. In caso di acquisizioni o fusioni, le emissioni precedenti a tali eventi vengono computate alla compagnia esistente dopo gli eventi stessi.
- 4) Calcolo degli usi *non-combustion*, che si configurano come stoccaggio di carbonio (*carbon storage*). Seguendo le metodologie proposte nell'ambito di diversi protocolli (EPA 2012a, b; IPCC, 2006, pagina 232 di Heede, 2014b), si ipotizzano tassi di stoccaggio pari a $St\% = 8.02\%$, 1.86% e 0.16% per combustibili liquidi, gas naturale e carbone, rispettivamente.

- 5) Valutazione dei contenuti di carbonio dei differenti combustibili, tramite l'utilizzo di linee guida internazionali, in particolare da linee guida IPCC (si vedano i valori finali riportati in Tabella 3 qui).
- 6) Valutazione di sorgenti di emissione addizionali (CO₂ da *gas venting/flaring*, CH₄ *fugitive/venting*). Tali emissioni sono quantificate tramite fattori suggeriti da IPCC (Tier 1, IPCC, 2006), corroborati con dati EPA relativi a *leakage* (perdita), *flaring*, and *venting rates* di CO₂ e CH₄ (EPA 2012a, b), da dati di *flaring* da World Bank (World Bank 2012a) e tassi di *venting* di CH₄ da miniere di carbone proposti da vari enti.
- 7) Conversione delle emissioni da metano in CO₂ equivalente CO₂e, tramite un fattore CH₄ = 21×CO₂ (su 100-anni di permanenza in atmosfera).
- 8) Calcolo delle emissioni da produzione di cemento per calcinazione (CaCO₃→CaO+CO₂), secondo i dati industriali contenuti nei report del World Business Council for Sustainable Development's Cement Sustainability Initiative (WBCSD 2011).

Si osservi incidentalmente qui, che le emissioni così calcolate includono la componente relativa alla combustione del prodotto venduto, ossia, secondo le emissioni così dette di TIPO SCOPE3. Tale circostanza viene anche rilevata nel testo dell'Atto, quando, a pag. 44 si dice:

“E’ opportuno precisare che questi dati (ndr, emissioni calcolate da Heede, 2014a;2014b)....includono le cosiddette emissioni Scope 3, cioè le emissioni che originano dalla combustione “a valle” del petrolio e del gas distribuito dalle compagnie....In generale la quota maggiore – fra l’85% e il 90%...delle emissioni dell’industria petrolifera sono di tipo Scope 3.”

Vale la pena ricordare che tali emissioni, se da un lato coprono circa il 90% del totale come indicato anche nell'Atto, dall'altro includono tutte le emissioni associate alle parti della catena del valore di un certo prodotto che si trovano a monte o a valle dell'attività dell'impresa in questione. Tra le prime (emissione a monte) si contano per esempio le emissioni legate alle attività dei fornitori (nel caso dell'estrazione dei combustibili fossili, per esempio, le emissioni legate alla produzione o al trasporto dei materiali necessari allo svolgimento dell'attività d'impresa), mentre le emissioni a valle includono le emissioni generate dall'utilizzo del prodotto (per esempio la combustione della benzina o del gasolio nelle automobili private dei clienti). Su questo aspetto si tornerà più avanti, in sede di discussione delle implicazioni per il Giudizio.

I risultati principali del lavoro di Heede (2014b) si possono così riassumere:

- 1) L'autore stima un totale di 914 miliardi di tonnellate di emissioni in CO₂ equivalente CO₂e (GtCO₂e) emessi dai 90 emettitori considerati, nel periodo 1854-2010 (Tabella 4).
- 2) Le emissioni così calcolate ricoprono il 63% delle emissioni industriali globali di CO₂ e CH₄ da combustione, *flaring*, *venting*, *fugitive*, utilizzo interno del prodotto e produzione di cementi dal 1751 al 2010 (si veda Figura 8).

Energy source	Carbon tC/unit	Carbon dioxide tCO ₂ /unit
Crude oil & NGLs	101.4 kgC/bbl	371.4 kgCO ₂ /bbl
Natural gas	14.6 kgC/kcf	53.4 kgCO ₂ /kcf
Lignite	328.4 kgC/tonne	1,203.5 kgCO ₂ /t
Subbituminous	495.2 kgC/t	1,814.4 kgCO ₂ /t
Bituminous	665.6 kgC/t	2,439.0 kgCO ₂ /t
Anthracite	715.6 kgC/t	2,621.9 kgCO ₂ /t
“Metallurgical coal”	727.6 kgC/t	2,665.9 kgCO ₂ /t
“Thermal coal”	581.1 kgC/t	2,129.3 kgCO ₂ /t

Tabella 3. Tab B-1 in Heede (2014a). Fattori finali emissivi per combustione (al netto degli usi non-energy). L'acronimo bbl indica un barile (159 litri), l'acronimo kcf indica un piede cubo (28.3 litri).

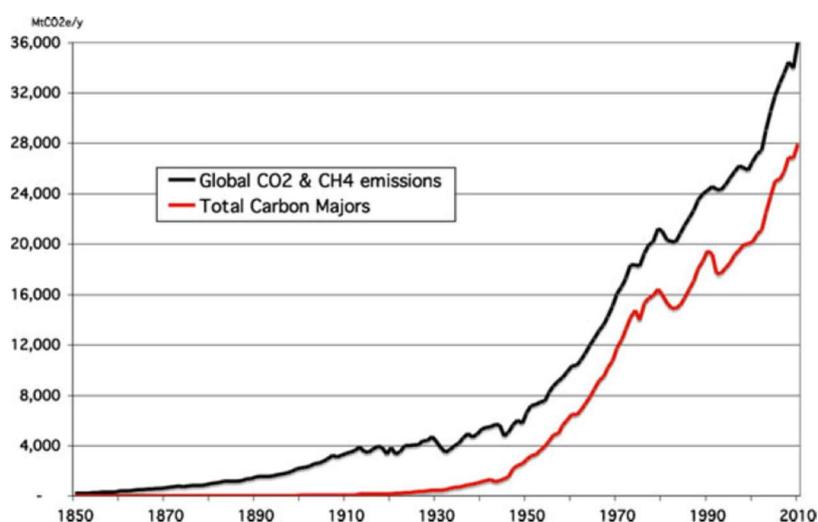


Figura 8. Emissioni 1850-2010. Globale e Carbon Majors. Emissioni globali da CDIAC più metano da Stern & Kaufmann e Commissione Europea (linea nera). In rosso, emissioni di CO₂ e CH₄ (in CO₂e). In: Heede (2014b), Figura 1.

Source	Carbon majors 1854–2010 GtCO ₂ e	CDIAC 1751–2010 * GtCO ₂ e	Carbon majors % of global
Oil & NGLs	365.7	472.0	77.5 %
Natural gas	120.1	176.1	68.2 %
Coal	329.6	642.5	51.3 %
Flaring	6.0	12.6	47.9 %
Cement	13.2	32.5	40.6 %
VentedCO ₂	4.8	na	na
Own fuel use	7.1	na	na
Fugitive methane	67.6	114.6	59.0 %
Sum	914.3	1,450.3	63.0 %

Tabella 4. Emissioni industriali di CO₂ e CH₄. Studio di Heede (2014b) vs studio CDIAC (Carbo Dioxide Information Analysis Center) dal 1751-2010 (Marland e Rotty 1984; Marland et al. 2011). In Heede (2014b), Table 1.

4.2.2 Emissioni ENI

Nei materiali di supporto all'articolo, in particolare in Heede (2014a) è possibile osservare le stime specifiche relative alle emissioni attribuite alle varie compagnie e *majors*, inclusa ENI.

In particolare, sul sito del *Climate Accountability Institute* CAI (www.climateaccountability.org), è possibile trovare (copie di) alcuni fogli di calcolo utilizzati per la valutazione delle emissioni, utilizzati poi da Heede (2014b).

In Figura 9 si riporta la schermata relativa al foglio di calcolo utilizzato per valutare le emissioni di ENI, in questo caso aggiornate fino al 2018 (Eni-4p_Heede 2014.pdf).

Qui, l'autore riporta *in primis* una descrizione di ENI tratta da Wikipedia (Dic 2011⁷) e poi dal sito web di ENI⁸ (www.eni.com/ENI_en_IT/company/history/our-history.page).

In Tabella 5 si riporta il dettaglio dei documenti utilizzati da Heede per le sue valutazioni. Come si può osservare dal dettaglio delle fonti, per lo più l'inventario di Heede sembra basarsi su report e documenti di tipo *deliverable* forniti da ENI stessa.

Riguardo all'affidabilità dei dati ottenuti, stimata (in maniera qualitativa) dall'autore stesso, su cui si ritornerà più avanti, sembra comunque potersi ipotizzare che i dati qui riportati siano verosimili, vista

⁷ Wikipedia (Dic11): *Eni S.p.A. is an Italian multinational oil and gas company, present in 70 countries, and currently Italy's largest industrial company with a market capitalization of 87.7 billion euros as of July 24, 2008. The Italian government owns a 30% golden share in the company, 20% held through the state Treasury and 10% held through the Cassa depositi e prestiti. History 1950s–1960s: Despite initial postwar plans to break up Agip, administrator Enrico Mattei converted it to a state monopoly, renamed Eni. The name derives from the initials of the company's original full title Ente Nazionale Idrocarburi, but is no longer used as an acronym. The Italian Government authorized its establishment on February 10, 1953 in order to implement a national energy strategy based on the concentration of all the activities in the energy sector into one group. Eni was to supply energy to Italy and contribute to the country's industrial development. Exploration and production: Its crude oil production comes primarily from Libya, Egypt, Nigeria, the Congo, the North Sea, and Angola, with smaller amounts of crude oil production in Tunisia and in the United States. Eni's China production began in 1992, although it currently amounts to only 1 percent of Eni's total crude oil production. In 2007, oil and natural gas production for the full year averaged 1.74 millions boe per day, making Eni Europe's third largest refiner, after Royal Dutch Shell and Total S.A. Eni carried out several hydrocarbon discoveries in recent years; the main discoveries were made in: Angola, Brazil, Congo, Egypt, Indonesia, Nigeria, Norway, Pakistan, Scotland, the Gulf of Mexico and Alaska. In 2007, a total of 81 new exploratory wells were drilled (43.5 of which represented Eni's share). Moreover, the company acquired oil and gas assets in the Gulf of Mexico from Dominion Resources and in onshore Congo from Maurel & Prom with total expenditures amounting to 4.52 billion euro. In January 2010 a consortium led by Eni was awarded a license to develop the Zubair field, one of the largest oil fields in Iraq. Natural gas: Eni operates in the supply, transport, distribution and sale of natural gas. Gas sales reached 99 billion cubic meters in 2007. In June 2008 the company bought a 57% stake in Distrigas, a Belgian company that supplies natural gas to industries, resellers and electricity producers. In March 2009 it bought the remaining 43%. In December 2010, Eni entered into the shale gas exploration market by acquiring Minsk Energy Resources owning three licences in the Polish Baltic basin.*

⁸ See also: www.eni.com/ENI_en_IT/company/history/our-history.page: *"The Start and the Early Post-War Years The 1920/30's - Italy Launches an Oil and Gas Policy Incorporation of AGIP. Exploration begun in Italy and foreign ventures initiated (Romania, Albania, Iraq). Exploration proceeds inside Italy and the Agip distribution network is created. Enrico Mattei is appointed Special Administrator to close down Agip. After discovery of the Caviaga gas field in the Po Valley, the process to liquidate Agip is halted. 1926 Establishment of AGIP (Azienda Generale Italiana Petroli) – Italian General Oil Company 1929 Discovery of the Fontevivo reservoir (Parma) 1931 Agreement with the Soviet Union for direct supply of crude oil 1934 New drilling technique with rotating drills; Agip can now reach 2,000 meters 1936 Agip enters into the refining and petrochemicals business 1938 Natural gas discovery at Podenzano in the Po Valley 1939 First natural gas pipeline in Italy between Petramala and Florence 1941 The Ente Nazionale Metano, Agip, Salsomaggiore Regie Terme and Surgi merged to become the Società Nazionale Metanodotti (Snam) to construct and operate pipelines and to distribute and sell the gas 1942-43 Construction of Snam's first natural gas pipeline, which carried gas from the Salsomaggiore wells to Lodi and Milan 1944 Discovery of the Caviaga field near Milan 1945 Enrico Mattei is appointed Provisional Administrator of Agip 1948 Natural gas field discovered at Ripalta (Cremona) 1949-52 Natural gas is discovered in the Po Valley. Between 1946 – 1950 Italian natural gas production increases from 20 million cubic meters to 305 million and the Italian natural gas transmission network expands from 354 km to 1266 km between 1949 and 1951."*

l'origine perlopiù relativa a fonti ENI e che quindi, a meno di successive valutazioni contrarie, almeno l'ordine di grandezza di tali stime sia corretto.

Si osservi ad ogni modo, che una stima, anche corretta dell'ammontare delle emissioni di una qualunque entità, ivi inclusa una *major* quale ENI, non comporta, di per sé, l'evidenza, né tantomeno la quantificazione, di un reale nesso causale con le variazioni delle variabili climatiche connesse al cambiamento climatico globale. Si osservi ovviamente, come non sia possibile per ragioni di tempo, condurre un'analisi equivalente per tutte le *majors* considerate da Heede (2014b).

Si osservi altresì che la stima delle emissioni totali in qualche modo influenza i risultati dell'analisi di tipo *SA*, come sopra indicato, poiché, da un lato, l'effetto non lineare di risposta del sistema atmosfera dipende dal cumulato delle emissioni e, dall'altro, tutti i metodi proposti per l'attribuzione, in qualche misura sono influenzati dalla cumulata e dalla *timeline* delle emissioni considerate, complementari alle emissioni *target* (i.e. soggette a valutazione di incidenza specifica, o *SA*).

D12: Total net worldwide crude oil plus natural gas liquids produced by each company or state-owned enterprise. Where data is available, we list net production. Crude production includes natural gas liquids (NGL) unless noted.	H12: Natural gas is typically reported as dry gas; natural gas liquids are reported under crude oil. Carbon dioxide is normally removed from the gas flow at the production site (see "Vented Carbon Dioxide"). SCM/d = standard cubic meters per day. "cf/d" = cubic feet per day.	E17: This column is ENI production in tonnes per year converted to bbl per year. 1962 and 1963 adds AGIP data for those years plus ENI data for those same years.
F17: Oil and gas production for 1950-1963 from E.N.I. Companies (1964) Annual Report, p. 55. Also shows minor production in average by decade starting in 1926.	E29: Crude oil production 1962-1971 from E.N.I. Company (1972) Annual Report, p. 6-7.	E39: Oil production for 1972-1975 from ENI (1976) AnnRpt.
F43: Oil production for 1976-77 from ENI (1978) AnnRpt, p. 66. Units in million tonnes per year.	I43: Gas production for 1976-77 from ENI (1978) AnnRpt, p. 66. Units in Billion SCM per year.	F45: Oil 1978-81 from ENI (1982) AnnRpt, p. 2.
I45: Gas 1978-81 from ENI (1982) AnnRpt, p. 2.	F50: Oil 1983-84 from ENI (1985) AnnRpt, p. 38.	F52: Oil 1985-86 from ENI (1987) AnnRpt, p. 26.
E54: Oil and NGL data for 1987-1994 from OGJ databooks (various).	D62: ENI Factbook 2005, p. 12, shows oil and condensate production for 1996-2005 in thousand bbl per day.	E62: Oil and NGL production 1995 from ENI (2003) Factbook 2003, p. 37.
I63: Sales of natural gas to third parties plus "own consumption of natural gas" for 1996-2004 from ENI Factbook 2005, p. 7. (2004: 72.79 and 3.70 billion cubic meters, respectively).	J63: ENI gas production 1996-2004 from Factbook 2005, p. 12, at a conversion of 6,000 cf gas per bbl of oil (unit of data in column L).	L63: OilGasENI_NorskHydro.xls. Eni SpA. ENI gas production 1996-2004 from Factbook 2005, p. 12, in thousand bbl oil equivalent per day.
D67: Oil production data from EI (2003) Top 100, p. 100.	E72: Oil & Gas Journal OGJ100, 17Sep07, page 39.	J72: Oil & Gas Journal OGJ100, 17Sep07, page 39.
D73: ENI Annual Rpt 2008, thousand bbl produced per day.	H73: ENI Annual Rpt 2008, million cubic feet produced per day.	I73: ENI rpt 2008, "worldwide gas sales," billion m ³ per year.
D76: ENI Annual Report 2010, page 7, reports liquids and natural gas production 2008-2010.	H76: ENI Annual report 2010, page 12.	L76: Oil & Gas Journal OGJ100, 30Oct2011, page 46.
D78: Eni Form 20-F with SEC for 2013, page 4.	H78: Eni Form 20-F with SEC for 2013, page 4. Also natural gas available for sale. Note 2: "Natural gas production volumes exclude gas consumed in operations (300, 318, 321, 383 and 451 mmCF/d in 2009, 2010, 2011, 2012 and 2013, respectively)." CAI: gas consumed in ops: 451 mmcf/d + 3,868 (available for sale) = 4,319, of which 451 = 10.44 percent.	E81: ENI Annual Report 2015, page 38. 2015: Consolidated subsidiaries: 325 mmbbl, plus equity-accounted entities: 6 mmbbl = total of 331 Mb. Americas, including USA, totaled 32 Mb.
J81: ENI Annual Report 2015, page 38. 2015: Consolidated subsidiaries: 1,673 Bcf, plus equity-accounted entities: 36 Bcf = total of 1,709 Bcf.	D83: Eni SpA SEC Form 20-F for 2018, with liquids production "available for sale" in kbpd for 2016-2018, page 43. Footnote (a): "It excludes production volumes of hydrocarbons consumed in operations. Said volumes were 119, 97 and 88 KBOE/d in 2018, 2017 and 2016, respectively."	H83: Eni SpA SEC Form 20-F for 2018, with natural gas production available for sale in Mcfpd for 2016-2018, page 43. Footnote (a): "It excludes production volumes of hydrocarbons consumed in operations. Said volumes were 119, 97 and 88 KBOE/d in 2018, 2017 and 2016, respectively." OilGasENI_NorskHydro.xls

Tabella 5 Data base utilizzato da Heede (2014b). Indicazioni relative alle celle del foglio in Figura 9. In **grassetto** si riportano i documenti apparentemente non tracciabili direttamente ad ENI.

La Tabella 12 in Heede (2014a), qui riprodotta in Tabella 6 riporta le emissioni cumulative (1751-2010) stimate, relative ad 81 (qui riportate solo fino al numero 28, ENI) entità (esclusi quindi gli stati a economia pianificata).

Oil & natural gas extraction data									
Richard Heede Climate Mitigation Services File started: 11 January 2005 Last modified: April 2019					Copyright Climate Accountability Institute				
ENI (Ente Nazionale Idrocarburi), Italy									
www.eni.com, www.eni.it Roma									
Production / Extraction data									
Year	Crude Oil & NGL			Natural Gas			OGJ data		
	Net production Thousand bbl /d	Net production Million bbl /yr	Net production Million tonnes/yr	Net production Million cf/d	Net production Million BCM/yr	Net production Billion cf/yr	Gross production Million tonnes/yr	Gross production Million tonnes/yr	
		AGP: ENI	ENI			AGP: ENI			
1950		0.04	0.01			306	10.8		
1951	Conversion from tonnes to bbl shows inconsistency	0.12	0.02			724	25.6		
1952		0.63	0.09			1,171	41.4		
1953		0.96	0.13			2,006	70.8		
1954		0.91	0.12			2,700	95.3		
1955		0.84	0.12			3,343	118.1		
1956		0.99	0.14			4,159	146.9		
1957		1.58	0.22			4,685	165.4		
1958		2.51	0.34			4,821	170.3		
1959		2.65	0.36			5,759	203.4		
1960		4.90	0.67			6,168	217.8		
1961		4.07	0.56			6,668	235.5		
1962		34.1	0.51			6,932	244.8		
1963		46.4	0.71			7,071	249.7		
1964		64.7					265.3		
1965		60.6					269.7		
1966		60.1					304.8		
1967		50.1					321.0		
1968		51.1					342.9		
1969		59.5					388.3		
1970		68.0					427.5		
1971		86.0					457.8		
1972		105.7					486.1		
1973		136.7					517.7		
1974		108.3					515.2		
1975		105.1					496.8		
1976		114.6	15.7			14,470	511.0		
1977		112.1	15.4			13,100	462.6		
1978		129.2	17.7			13,750	485.6		
1979		126.3	17.3			13,730	484.9		
1980		121.2	16.6			14,220	502.2		
1981		86.9	11.9			14,550	513.8		
1982	Interpolated	89.6	12.3			13,890	490.5	Interpolated	
1983		92.4	12.7			13,230	467.2		
1984		104.2	14.3			13,730	484.9		
1985		104.4	14.3			13,750	485.6		
1986		102.9	14.1			14,770	521.6		
1987		126.1	Ente nazionale Idrocarburi			566.5	Ente nazionale Idrocarburi		
1988		139.3	Ente nazionale Idrocarburi			617.9	Ente nazionale Idrocarburi		
1989		157.6	Ente nazionale Idrocarburi			621.5	Ente nazionale Idrocarburi		
1990		175.9	AGP			642.7	AGP		
1991		178.1	AGP			656.8	AGP		
1992		189.1	AGP			625.1	AGP		
1993		195.0	AGP			713.4	AGP		
1994		210.3	AGP			798.6	AGP		
1995		612	223.4			809.4	AGP		
1996		614	224.1			810.3	AGP		
1997		646	235.8			821.3	AGP		
1998		653	238.3			843.2	AGP		
1999		674	246.0			854.1	AGP		
2000		748	273.0			961.4	AGP		
2001		857	312.8			1,121.3	AGP		
2002		921	336.2			1,206.7	AGP		
2003		981	358.1			1,272.4	AGP		
2004		1,034	377.4			1,292.1	AGP		
2005			404.0			1,447.0	AGP		
2006		1,079	393.8			3,964	98.10	1,446.9	
2007		1,020	372.3			4,114	98.96	1,501.6	
2008		1,026	374.5			4,424	104.23	1,614.8	
2009		1,007	367.6			4,374		1,596.5	
2010		997	363.9			4,540		1,657.1	
2011		845	308.4			3,763		1,373.5	
2012		882	321.9			4,118		1,503.1	
2013		833	304.0			3,868		1,411.8	
2014			302.0					1,541.0	
2015			331.0					1,709.0	
2016		878	320.5	Form 20-F		4,329		1,580.1	
2017		852	311.0	Form 20-F		4,734		1,727.9	
2018		884	322.7	Form 20-F		4,630		1,690.0	
Total	na	11,235	166	na		49,215	na	na	

Figura 9 Valutazione delle emissioni di ENI 1950-2018.

Table 12. All 81 investor- & state-owned carbon & cement entities and cumulative emissions

Entity	Products Flaring, own fuel, Fugitive (fuel, cement) vented CO ₂ methane			Total	Percent
	GtCO ₂	GtCO ₂	GtCO ₂ e	emissions GtCO ₂ e	of global 1751-2010
1. ChevronTexaco, USA	46.28	1.48	3.34	51.10	3.52%
2. ExxonMobil, USA	41.60	1.54	3.53	46.67	3.21%
3. Saudi Aramco, Saudi Arabia	42.82	1.03	2.18	46.03	3.17%
4. BP, UK	32.51	1.02	2.31	35.84	2.47%
5. Gazprom, Russian Federation	25.09	2.13	4.92	32.14	2.22%
6. Royal Dutch Shell, The Netherlands	27.57	0.99	2.19	30.75	2.12%
7. National Iranian Oil Company	26.71	0.76	1.62	29.08	2.01%
8. Pemex, Mexico	18.14	0.59	1.29	20.03	1.38%
9. British Coal Corporation, UK *	17.74	0.00	1.50	19.25	1.33%
10. ConocoPhillips, USA	14.70	0.67	1.50	16.87	1.16%
11. Petroleos de Venezuela	14.77	0.44	0.95	16.16	1.11%
12. Coal India	14.28	0.00	1.21	15.49	1.07%
13. Peabody Energy, USA	11.46	0.00	0.97	12.43	0.86%
14. Total, France	10.79	0.35	0.77	11.91	0.82%
15. PetroChina, China	9.67	0.28	0.61	10.56	0.73%
16. Kuwait Petroleum Corp.	9.80	0.23	0.48	10.50	0.72%
17. Abu Dhabi NOC, UAE	8.84	0.26	0.57	9.67	0.67%
18. Sonatrach, Algeria	7.96	0.40	0.91	9.26	0.64%
19. Consol Energy, Inc., USA	8.38	0.00	0.71	9.10	0.63%
20. BHP Billiton, Australia	6.97	0.06	0.58	7.61	0.52%
21. Anglo American, UK	6.68	0.00	0.57	7.24	0.50%
22. Iraq National Oil Company	6.70	0.14	0.29	7.14	0.49%
23. RWE, Germany	6.31	0.00	0.54	6.84	0.47%
24. Pertamina, Indonesia	6.16	0.21	0.46	6.83	0.47%
25. Libya National Oil Corp.	6.22	0.15	0.32	6.69	0.46%
26. Nigerian National Petroleum	6.06	0.15	0.33	6.54	0.45%
27. Petrobras, Brazil	5.49	0.16	0.34	5.99	0.41%
28. ENI, Italy	5.20	0.24	0.54	5.97	0.41%
Total IOC & SOE producers	543.23	15.68	43.58	602.49	41.54%
Total CDIAC, 1751-2010	1,323.09	na	114.65	1,450.33	
Percent this study of CDIAC	41.06%	na	38.01%	41.54%	

Tabella 6 Emissioni cumulative (1751-2010) stimate, relative ad 81 (qui riportate solo fino al numero 28, ENI) entità. In Heede (2014a) Table 12.

Sulla base dei risultati qui riportati, Heede (2014b), sostiene che ENI si possa ritenere responsabile di emissioni cumulate pari a $E_{cum,Eni} = 5.97$ GtCO₂e, ossia per una percentuale pari allo 0.41% delle emissioni totali da combustione sul periodo 1751-2010 (in realtà, 1950-2010, quantificate come si osserva in $E_{cum,Tot} = 1,450.33$ GtCO₂e).

Gli Attori (pag. 43) sembrano riportare come Heede (2014a,b) quantifichi le emissioni cumulative di ENI in termini di CO₂ e CH₄ nel periodo 1988-2015 nel valore 0.6% delle emissioni cumulate globali da combustione. Tale attribuzione, relativa all'anno 2015, pare incongrua. Si osservi infatti come il lavoro di Heede mostri dati relativi al massimo al 2010. L'attribuzione 0.6% è verosimilmente dovrebbe derivata dal report *Carbon Majors Database 2017*, menzionato dagli Autori a pagina 43 del contenzioso. In tale report è riportata, a pagina 14 la percentuale cumulata stimata delle emissioni nel periodo 1988-2015 di Eni (oltre ad altre *majors*), pari allo 0.6%.

4.2.3 Fonti di incertezza

Heede (2014b) discute limitazioni e fattori di incertezza del suo studio. In sintesi, l'autore suggerisce che

- 1) I valori di produzione ed emissioni attribuiti sono verosimilmente conservativi, poiché i) i registri di produzione non sempre sono disponibili andando indietro nel tempo e ad esempio la produzione di gas naturale non veniva conteggiata fino agli anni '30 del 20 secolo, ii) i fattori emissivi adottati sono tipicamente al di sotto o al più uguali a quelli internazionali, iii) gli usi *non-energy* nei primi decenni di attività erano più bassi rispetto al tasso utilizzato nello studio (ca. 8%), iv) perdite accidentali ed emissioni, dovute per esempio a sabotaggio durante la Seconda guerra mondiale, non sono state considerate. Inoltre, le emissioni per produzione di cemento datano dal 1990 in poi (Cina a parte).
- 2) Fonti potenziali di doppi conteggi sono state minimizzate per quanto possibile.
- 3) Nel periodo 1950-1970 varie *majors* riportavano dati di produzione lorda, che ha richiesto l'applicazione di un coefficiente lordo-netto basato su dati degli anni successivi.
- 4) Varie compagnie di stato forniscono dati di produzione attribuibili, almeno in parte a *joint-venture* internazionali, oppure a partner che condividono la produzione, oppure dati incompleti, o relativi al solo territorio nazionale o alle acque territoriali. I dettagli di tali attività congiunte non sono sempre disponibili. Tuttavia, ogni compagnia di Stato è stata studiata, per verificare il più possibile variazioni di assetto (*e.g.* nazionalizzazione), operazioni di acquisizione societaria, vendita di *asset* e frazionamento delle quote di produzione nazionale.
- 5) Le emissioni di CH₄ attribuite sono conservative, rispetto alle emissioni globali dell'industria del carbone (38% di metano legato al carbone vs 51% della produzione globale di carbone). I tassi di emissione standard di emissioni di CH₄ forniti da IPCC sono stati applicati a tutte le *majors* del carbone, scalati in proporzione alla produzione tramite *mining* (60% sottoterra, 40% a cielo aperto) (IPCC 2006; World Coal Association, 2005). Tuttavia, le modalità estrattive non sono sempre note e questo può portare ad una attribuzione eccessiva, o viceversa. Inoltre, le compagnie tendono a non fornire informazioni dettagliate sulla generazione di CH₄, *venting*, *flaring*, etc.
- 6) Fattori atti a valutare l'uso *non-energy* e le emissioni dirette di CO₂ (*flaring*, *venting*) e CH₄ *fugitive*, sono basati su *standard* e dati di letteratura (IPCC 2006, etc.), ma le attività delle *majors* possono differire da questi *standard*.
- 7) Si ipotizza che il consumo di energia da prodotto interno oscilli tra il 5.9% per il gas ed il 9.5-10% per l'uso combinato di gas e petrolio (IPIECA, 2011).

Sulla base di tali considerazioni, l'autore suggerisce che data la varietà e complessità delle compagnie ed entità coinvolte, la qualità e completezza dei rapporti e le potenziali emissioni aggiuntive (*flaring*, etc.) assai variabili tra le entità coinvolte, risulta difficile fornire una valutazione di affidabilità/incertezza.

Tuttavia, l'autore sottolinea l'aderenza delle stime condotte, in particolare in relazione alle emissioni totali da (i produttori di) combustibili fossili, rispetto alle stime CDIAC proporzionate per la produzione di combustibili fossili nel periodo 1980-2010 (-2.3 % per petrolio e gas liquido NGLs, +1.0 % per il gas naturale, +3.3 % per il carbone).

Heede (2014a), a pag. 62-72, conduce una dettagliata analisi dei fattori di incertezza (si veda Table B-2), suggerendo una complessa interazione tra le possibili fonti di inaccuratezza, che rende difficile la composizione di tali fonti.

Nel Sommario/*Abstract* di tale *report* (Heede, 2014a, pag. 5), l'autore riporta che l'incertezza sulle stime complessive si aggira intorno al $\pm 10\%$, mentre per le singole entità tale incertezza può raggiungere anche un valore intorno a $\pm 15\%$ ¹⁰.

4.2.4 Implicazioni per la Source Attribution

Come riportato sopra, Heede (2014b) propone l'utilizzo dei suoi risultati per i fini di un esercizio di (*Source*) *Attribution* indirizzato verso specifici emettitori, allo scopo di attribuzione di responsabilità¹¹, come strumento potenzialmente alternativo agli accordi UNFCCC del 1992, incentrati sulla responsabilità degli Stati, che, a detta dell'autore, si è dimostrato carente.

Si osservi tuttavia, che tale approccio non è mai stato formalizzato nell'ambito di accordi specifici, ad esempio sulla base dei presupposti ipotizzati nella *BP*.

Le motivazioni riportate da Heede per supportare tale approccio, di particolare interesse, si possono così riassumere:

- 1) Poiché queste *carbon majors* hanno ricevuto benefici considerevoli e così i Paesi che le ospitano, sembra ragionevole, ipotizzare che tali *majors* abbiano una "motivazione etica" di aiutare nella gestione della instabilità climatica, tanto più che tali *majors* possiedono le risorse finanziarie e le capacità tecniche per contribuire a mitigazione ed adattamento climatico¹².
- 2) Le *majors* possiedono opzioni per la mitigazione, adattamento e miglioramento del clima¹³, di cui l'autore fornisce una breve esemplificazione (pag. 236).
- 3) La maggior parte delle entità considerate possiedono le capacità tecniche ed istituzionali necessarie a guidare la ricerca in tema di cattura e stoccaggio del carbonio¹⁴.

Utilizzi specifici del metodo proposto vengono altresì suggeriti dall'autore a pag. 37, ossia:

- 1) L'analisi fornita può fornire una base per valutare le quantità di carbonio da catturare e stoccare dalle entità per compensare il loro contributo al cambiamento climatico.¹⁵

¹⁰ "Overall uncertainty is ± 10 percent... The quality and completeness of production data...means that uncertainties for individual entities are often higher-typically in the ± 10 -15 percent range". Heede (2014a). *Abstract*, p. 5

¹¹ "While not disputing the logic of the UNFCCC, the analysis presented here suggests a somewhat different, and perhaps useful, way to consider responsibility for climate change". Heede (2014b) p. 235.

¹² "Considerable benefits have accrued to these carbon majors, and to their state-sponsors and investors. Given this, it seems reasonable to argue that they have an ethical obligation to help address climate destabilization..Moreover, many of these entities—both state- and investor-owned—possess the financial resources and technical capabilities to develop and contribute to climate change mitigation and adaptation." Heede (2014b) p. 236.

¹³ "The full menu or analysis of mitigation, adaptation, and climate amelioration options available to the global carbon industry is beyond the scope of this paper" *Ibidem*.

¹⁴ "...most of the entities highlighted in this analysis have the technical and institutional capabilities necessary to lead research and development in carbon capture and storage.." *Ibidem*.

¹⁵ "This analysis could provide a basis for calculating the amounts of carbon that would have to be captured and stored by various entities to compensate for their contributions to climate change.." Heede (2014b) p. 237.

- 2) L'analisi delle emissioni storiche può essere applicata alle riserve di ogni entità per valutare future necessità di cattura e stoccaggio di carbonio.¹⁶

Nelle sue conclusioni, Heede propone alcune riflessioni, in particolare riporta che “la maggior parte delle analisi condotte finora (*ndr*, al 2014) considerano le responsabilità per il cambiamento climatico in termini di nazioni-stati. Lo spostamento della prospettiva verso entità di tipo *corporate*- private o di stato- apre nuove opportunità per quelle entità, per divenire parte della soluzione, piuttosto che osservatori passivi (e con un profitto) alla continua alterazione climatica¹⁷”.

Sulla base di quanto detto, si può osservare che il lavoro di Heede (2014b), che è divenuto la base per evoluzioni successive in tema di *Source Attribution*, si configura di fatto come un inventario emissivo, applicato a livello di singole compagnie.

Dall'analisi del testo si osserva come, al di là di alcune considerazioni teoriche qui riportate, l'autore non propone di fatto alcun metodo per la *Source Attribution*, intesa come “l'identificazione del contributo relativo di differenti settori, attività ed entità ai cambiamenti climatici.”

Infatti, mentre l'autore mostra una ripartizione (verosimile, ma soggetta ad incertezza) dei carichi emissivi, egli non propone alcun metodo per collegare tale ripartizione ad un impatto sulla dinamica del clima, globale o locale, al di là di un generico nesso di tipo proporzionale. In effetti, l'autore non propone nemmeno di considerare una proporzionalità diretta (*i.e.* lineare) tra la ripartizione dei carichi emissivi ed il risultato in termini di attribuzione.

Per tale motivo, mentre si può riconoscere che il lavoro di Heede (2014b) abbia un valore rilevante per quanto riguarda la quantificazione delle emissioni (inventario), non sembra doversi riconoscere a tale lavoro un valore, se non generico, riguardo al tema della *Source Attribution*.

4.3 Ekwurzel et al. (2017)

4.3.1 Valori delle variabili climatiche-oceaniche di rilievo per la citazione

Nell'Atto di citazione viene menzionato (pag. 43-44), pur senza apparentemente includere una citazione esplicita, il lavoro (articolo su rivista *peer reviewed Climatic Change*) di Ekwurzel et al. (2017). In particolare, gli Attori scrivono (pag. 44):

“Ekwurzel e colleghi hanno esteso l'analisi originale di Heede (2014b, ndr) connettendo le attività delle majors del carbonio alle concentrazioni di gas di serra nell'atmosfera e ad alcuni impatti climatici associati.”

E, di seguito:

“Il data base su cui si basa il lavoro di Ekwurzel et al. (2017) consente di attribuire ad Eni nel periodo 1980-2010: 1) fra 0.309 e 0.395 ppm di contribuzione all'aumento della CO₂ in atmosfera; 2) fra

¹⁶ “Analysis based on historic emissions can also be applied to each entity's own carbon reserves and shares of its future carbon production that would need to be captured and stored” *Ibidem*.

¹⁷ “Most analyses to date, as well as the UNFCCC structure, consider responsibility for climate change in terms of nation-states. Such analyses fit the framework of international law, insofar as treaties and conventions are based on agreements between nation-states. However, responsibility can be understood in other ways as well, as done in the present analysis tracing emissions to major carbon producers. Shifting the perspective from nation-states to corporate entities—both investor-owned and state-owned companies—opens new opportunities for those entities to become part of the solution rather than passive (and profitable) bystanders to continued climate disruption” Heede (2014b). p. 238

0,0013 e 0,0037 °C di contribuzione all'aumento temperatura media terrestre globale; e 3) fra 0.04 e 0.21 (0.27, ndr) mm di aumento globale del livello dei mari.”

Secondo gli Attori, quindi, il lavoro di Ekwurzel et al. (2017) mostrerebbe prove sostanziali che il contributo di ENI in termini di emissioni atmosferiche (qui riportato per il periodo 1980-2010) abbia contribuito in modo significativo/rilevante alle dinamiche di riscaldamento globale, nel periodo indicato. Su tale circostanza si ritornerà in seguito.

Heede (2014b) non riporta in effetti delle stime relative al contributo delle *majors* (ivi inclusa ENI) alla variazione delle concentrazioni atmosferiche di CO₂ (tema che invece viene affrontato in Ekwurzel et al., 2017), ma si limita a riportare valori stimati di emissioni cumulate.

Si noti che gli Attori riportano dei risultati contenuti nel “*..data base su cui si basa il lavoro di Ekwurzel et al. (2017)..*”, ossia, di fatto nel lavoro di Heede (2014a).

Le elaborazioni proposte da Ekwurzel et al. (2017) a sostegno del loro lavoro sono presenti nel file “10584_2017_1978_MOESM2_ESM.xlsx”, accluso al materiale supplementare resi disponibili online nel sito della rivista (<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-017-1978-0>).

Vale la pena qui di ricordare che anche i calcoli condotti in Ekwurzel et al. (2017), si basano su un inventario (nei fatti, da Heede, 2014a) che include anche le emissioni di tipo SCOPE3.

In Tabella 7 si riportano i contributi in termini di concentrazioni atmosferiche (ppm CO₂) stimati di ENI per i periodi 1880-2010 e 1980-2010 e relative percentuali sul totale. In Tabella 8 si riportano i contributi termici (°C) stimati di ENI per i periodi 1880-2010 e 1980-2010 e relative percentuali sul totale. In Tabella 9 si riportano i contributi marini (mm) stimati di ENI per i periodi 1880-2010 e 1980-2010 e relative percentuali sul totale.

Si osservi in prima istanza l'ampia gamma (*range*) dei valori ivi mostrati, riguardo l'impatto ipotizzato delle emissioni ENI.

Riguardo il livello di CO₂, come si osserva, il contributo ipotetico fornito da ENI si situerebbe tra $\Delta\text{CO}_2 = 0.309\text{-}0.395$ ppm, con una variazione potenziale pari a $\delta\Delta\text{CO}_2 = 0.086$ ppm, o $\delta\Delta\text{CO}_2\% = \pm 12\%$ (rispetto al valore centrale/medio).

In termini di effetto termico (GMST), si osserva $\Delta\text{GMST} = +0.0017\text{-}0.0037$ °C, con una variazione potenziale pari a $\delta\Delta\text{GMST} = 0.002$ °C, o $\delta\Delta\text{GMST}\% = \pm 48\%$ (rispetto al valore centrale/medio), ossia con $\delta\Delta\text{GMST}\% = 4 \times \delta\Delta\text{CO}_2\%$, e con una amplificazione della gamma (incertezza) di un fattore 4.

In termini di livello marino (GSL), si osserva $\Delta\text{GSL} = 0.04\text{-}0.27$ mm (e non 0.21 mm, come riportato nel testo della citazione), con una variazione potenziale pari a $\delta\Delta\text{GSL} = 0.23$ mm, o $\delta\Delta\text{GSL}\% = \pm 148\%$ (rispetto al valore centrale/medio), ossia con $\delta\Delta\text{GSL}\% \approx 12 \times \delta\Delta\text{CO}_2\%$, e con una amplificazione della gamma (incertezza) di un fattore 6, rispetto alla gamma dei valori di CO₂.

Tale estensione della variazione del *range* dei valori plausibili (secondo le analisi contenute nel lavoro) delle variabili di studio (ΔGMST , ΔGSL), in risposta alla variazione delle concentrazioni di CO₂ (legate ad ENI) ΔCO_2 implica chiaramente la presenza di un fattore di amplificazione della gamma (e di fatto, dell'incertezza della stima), in risposta a *input* incerti (le variazioni di CO₂).

Tale amplificazione si presume possa essere legata alla risposta dei modelli utilizzati, in particolare in risposta a i) non-linearità della risposta del sistema atmosfera e ii) incertezza/variabilità alle ipotesi e parametri del modello.

Riguardo al tema della non-linearità ed in particolare della dipendenza della risposta dalla storia emissiva precedente si è già argomentato. Riguardo alla variabilità in risposta a fattori (ipotesi) di *input* e parametri, si tornerà a breve, a valle di una disamina dell'approccio proposto dagli autori. Si osservi tuttavia fin d'ora come, in relazione a ipotesi differenti su vari aspetti modellistici, il risultato in termini di potenziali impatti calcolati varia in maniera notevole (benché, in assoluto piccola, *i.e.* minore del 1% del totale).

Si osservi altresì, come riportato in seguito, che i valori massimi e minimi riportati, si riferiscono di fatto alle due condizioni di esclusione (minimi) ed inclusione (massimi), del contributo degli *aerosol* da combustione. Gli autori del lavoro dichiarano apertamente come, al momento della stesura del *paper*, non fosse possibile attribuire ai singoli emettitori gli effetti di eventuali *aerosol* da combustione.

Tale circostanza, che visibilmente impatta in modo forte sui risultati presentati, mostra chiaramente come tale *gap* di conoscenza sia rilevante ai fini dello studio e di eventuali valutazioni su esso basate. Su tale aspetto si tornerà in seguito.

<i>ESM Table 4. Contribution from emissions (1880-2010; 1980-2010) traced to individual carbon producers to increase in atmospheric carbon dioxide (CO₂) 1880-2010 (ppm; %)</i>													
Emissions removed from 1880-2010													
Model forcing		Full historical forcing A1											
Thermal and carbon parameters		Low				Best				High			
Model reference atmospheric carbon dioxide (CO ₂) rise 1880-2010 (ppm)		93				103				114			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,360	0,014	0,389	0,015	0,404	0,020	0,392	0,019	0,452	0,028	0,396	0,025
Full historical forcing minus historical fossil fuel aerosols A0													
		Low				Best				High			
Model reference atmospheric carbon dioxide (CO ₂) rise 1880-2010 (ppm)		93				105				117			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,364	0,014	0,389	0,015	0,409	0,019	0,391	0,019	0,460	0,028	0,395	0,024
Emissions removed from 1980-2010													
Full historical forcing A1													
		Low				Best				High			
Model reference atmospheric carbon dioxide (CO ₂) rise 1880-2010 (ppm)		93				103				114			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,309	0,007	0,334	0,008	0,347	0,010	0,336	0,010	0,388	0,015	0,340	0,013
Full historical forcing minus historical fossil fuel aerosols A0													
		Low				Best				High			
Model reference atmospheric carbon dioxide (CO ₂) rise 1880-2010 (ppm)		93				105				117			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)	ppm	Error (ppm)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,312	0,007	0,334	0,008	0,351	0,010	0,336	0,009	0,395	0,014	0,339	0,012

*Tabella 7. Contributi emissivi (ppm CO₂) stimati di ENI per i periodi 1880-2010 e 1980-2010 e relative percentuali sul totale. Ekwurzel et al. (2017). Materiale supplementare (file 10584_2017_1978_MOESM2_ESM.xlsx). Si osservi l'indicazione relativa alla variazione di concentrazione globale di CO₂ (Model reference atmospheric carbon dioxide (CO₂) rise 1880-2010 (ppm)), nei due casi con/senza inclusione dell'effetto degli aerosols (Full historical forcing/minus historical fossil fuel aerosols). Si osservi il riferimento ai parametri termici e di emissione carbonica (Thermal and carbon parameters, Low/Best/High), spiegato nel testo qui. Si osservi il valore delle stime e relativo errore nei vari casi (Error %, Error ppm). In **grassetto** nella Tabella i valori riportati nella citazione per il 1980-2010 (0.309-0.395 ppm). Si osservino gli estremi dei valori percentuali (rispetto al totale di emissioni atmosferico), in corsivo (0.334%-0.340%) per il 1980-2010, sempre ampiamente inferiori all'1% della corrispondente stima totale.*

<i>ESM Table 5. Contribution from emissions (1880-2010; 1980-2010) traced to individual carbon producers to increase in global mean surface temperature (GMST) 1880-2010 degrees Celsius (°C); %</i>													
Emissions removed from 1880-2010													
Model forcing		Full historical forcing A1											
Thermal and carbon parameters		Low				Best				High			
Model reference global mean surface temperature (GMST) rise 1880-2010 (degrees Celsius)		0,7				0,8				1,0			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,002	0,00004	0,235	0,006	0,0027	0,00007	0,335	0,008	0,0045	0,00009	0,448	0,009
Full historical forcing minus historical fossil fuel aerosols A0													
		Low				Best				High			
Model reference global mean surface temperature (GMST) rise 1880-2010 (degrees Celsius)		0,8				1,0				1,3			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,0016	0,00004	0,206	0,006	0,0027	0,00007	0,280	0,007	0,0046	0,00010	0,358	0,008
Emissions removed from 1980-2010													
Full historical forcing A1													
		Low				Best				High			
Model reference global mean surface temperature (GMST) rise 1880-2010 (degrees Celsius)		0,7				0,8				1,0			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,0013	0,00003	0,194	0,004	0,0022	0,00005	0,274	0,006	0,0037	0,00008	0,364	0,007
Full historical forcing minus historical fossil fuel aerosols A0													
		Low				Best				High			
Model reference global mean surface temperature (GMST) rise 1880-2010 (degrees Celsius)		0,8				1,0				1,3			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)	°C	Error (°C)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,0013	0,00003	0,170	0,004	0,0022	0,00005	0,229	0,005	0,0037	0,00008	0,291	0,007

Tabella 8. Contributi termici (°C) stimati di ENI per i periodi 1880-2010 e 1980-2010 e relative percentuali sul totale. Ekwurzel et al. (2017). Materiale supplementare (file 10584_2017_1978_MOESM2_ESM.xlsx). Si osservi l'indicazione relativa alla variazione di temperatura globale termica (Model reference global mean surface temperature (GMST) rise 1880-2010 (°C)), nei due casi con/senza inclusione dell'effetto degli aerosols (Full historical forcing/minus historical fossil fuel aerosols). Si osservi il riferimento ai parametri termici e di emissione carbonica (Thermal and carbon parameters, Low/Best/High), spiegato nel testo qui. Si osservi il valore delle stime e relativo errore nei vari casi (Error %, Error °C). In **grassetto** nella Tabella i valori riportati nella citazione per il 1980-2010 (0.013-0.037 °C). Si osservino gli estremi dei valori percentuali (rispetto al totale di emissioni atmosferico), in corsivo (0.170%-0.364%) per il 1980-2010, sempre ampiamente inferiori all'1% della corrispondente stima totale.

<i>ESM Table 5. Contribution from emissions (1880-2010; 1980-2010) traced to individual carbon producers to increase in global mean surface temperature (GMST) 1880-2010 degrees Celsius (°C); %</i>													
Emissions removed from 1880-2010													
Model forcing		Full historical forcing A1											
Thermal and carbon parameters		Low				Best				High			
Model reference global sea level (GSL) rise 1880-2010 (millimeters)		68				177				212			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,07	0,001	0,11	0,002	0,28	0,005	0,16	0,003	0,50	0,01	0,24	0,003
Full historical forcing minus historical fossil fuel aerosols A0													
		Low				Best				High			
Model reference global sea level (GSL) rise 1880-2010 (millimeters)		79				221				292			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,07	0,001	0,09	0,002	0,28	0,005	0,13	0,002	0,51	0,01	0,17	0,002
Emissions removed from 1980-2010													
		Low				Best				High			
M Model reference global sea level (GSL) rise 1880-2010 (millimeters)		68				177				212			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,04	0,001	0,06	0,001	0,15	0,002	0,09	0,001	0,26	0,004	<i>0,12</i>	0,002
Full historical forcing minus historical fossil fuel aerosols A0													
		Low				Best				High			
Model reference global sea level (GSL) rise 1880-2010 (millimeters)		79				221				292			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)	mm	Error (mm)	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	0,04	0,001	<i>0,05</i>	0,001	0,15	0,003	0,07	0,001	0,27	0,004	0,09	0,001

Tabella 9 Contributi marini (mm) stimati di ENI per i periodi 1880-2010 e 1980-2010 e relative percentuali sul totale. Ekwurzel et al. (2017). Materiale supplementare (file 10584_2017_1978_MOESM2_ESM.xlsx). Si osservi l'indicazione relativa alla variazione di temperatura globale termica (Model reference global sea level (GSL) rise 1880-2010 (millimeters)), nei due casi con/ senza inclusione dell'effetto degli aerosols (Full historical forcing/minus historical fossil fuel aerosols). Si osservi il riferimento ai parametri termici e di emissione carbonica (Thermal and carbon parameters, Low/Best/High), spiegato nel testo qui. Si osservi il valore delle stime e relativo errore nei vari casi (Error %, Error °C). In **grassetto** nella Tabella i valori riportati nella citazione per il 1980-2010 (0.04-0.27 mm). Si osservino gli estremi dei valori percentuali (rispetto al totale di emissioni atmosferico), in corsivo (0.05%-0.12%) per il 1980-2010, sempre ampiamente inferiori all'1% della corrispondente stima totale.

4.3.2 Metodi

Ekwurzel et al. (2017) conducono in sostanza un'analisi indirizzata a convertire le stime di carichi emissivi (in particolare qui, quelli relativi al lavoro di Heede, 2014b) in stime del contributo dei rispettivi produttori su variabili del sistema terrestre¹⁸, in particolare:

- 1) L'incremento osservato delle concentrazioni di CO₂ in atmosfera.
- 2) L'incremento osservato della temperatura media globale GMST.
- 3) L'incremento osservato del livello marino globale GSL.

Si considerano nello studio 90 produttori, già considerati in Heede (2014b) e si procede alle valutazioni sopra riportate tramite approcci modellistici. L'analisi si focalizza su due periodi, 1880-2010 e 1980-2010.

Rispetto allo studio di Heede (2014b), Ekwurzel et al. (2017) introducono alcune modifiche. Heede nel suo studio ipotizza che il metano CH₄ abbia un potenziale impatto climatico (*Global Warming Potential*) GWP = 21 volte quello della CO₂ e che il cumulato (su un determinato periodo storico) di emissioni di carbonio sia un buon indicatore per valutare l'impatto delle emissioni sulle temperature medie globali (GMST, IPCC 2013). Tale ultima approssimazione, tuttavia vale su periodi prolungati, ma non su periodi brevi (Ricke e Caldeira, 2014). Inoltre, tale ipotesi non si adatta al Metano, per nessun valore di GWP. Per tale motivo, il calcolo delle emissioni in atmosfera viene qui condotto in maniera più corretta (si noti tuttavia che a stretto rigore, l'analisi di Heede (2014b), non si estende al calcolo delle concentrazioni in atmosfera, ma solo dei cumulati emissivi, ne riporta ipotesi sugli impatti termici).

Lo strumento di base utilizzato da Ekwurzel et al. (2017) è un modello accoppiato di bilancio energetico, climatico di ciclo del carbonio ("*a global energy-balance coupled climate-carbon-cycle model* (Millar et al. 2016)", Ekwurzel et al. 2017, pag. 581).

Tale modello dovrebbe consentire di valutare l'effetto di forzanti naturali ed antropiche (emissive, o gas di serra *green house gas* GHG) che si includano o escludano (*ndr*, dagli input del modello), allo scopo di valutare il contributo relativo delle forzanti antropiche, con livelli di incertezza rilevanti a livello di sviluppo delle politiche.¹⁹

Il modello, chiamato FAIR (Millar et al., 2016) rappresenta una estensione di un modello precedente, denominato "modello di risposta impulsiva" di IPCC, AR5-IR. FAIR, modificato per tenere in conto della risposta del sistema terra (e più precisamente del sistema di accumulo/serbatoio di CO₂) alla variazione delle temperature. Il modello (di cui si conduce un'analisi puntuale poco più avanti) prende come dati in ingresso valori di emissioni di CO₂ su base annua (in ppm, con l'equivalenza 1ppm = 2.12 GtC, giga tonnellate di carbonio). Sulla base poi di (semplici) ipotesi sulla capacità di stoccaggio

¹⁸ "Here, we use a simple climate model to quantify the contribution of historical (1880–2010) and recent (1980–2010) emissions traced to these producers to the historical rise in global atmospheric CO₂, surface temperature, and sea level.". Ekwurzel et al. (2017), p. 579.

¹⁹ "This approach allows for natural and anthropogenic forcings to be included or excluded to test the relative contributions from anthropogenic emissions at policy-relevant levels of uncertainty". Ekwurzel et al. (2017). p. 582.

della CO₂ in 4 differenti comparti ambientali/serbatoi, il modello produce una stima della (anomalia annua della) concentrazione di CO₂ in atmosfera.

Tramite equazioni opportune, tale anomalia viene aggiunta al valore di concentrazione assoluto tempo variante, nonché alla corrispondente stima di un valore di forzante radiativa (*i.e.* un valore, espresso in Watt su metro quadro, Wm⁻², che fornisce l'incremento di energia assorbita all'interno del sistema terrestre, in risposta alla nuova concentrazione di CO₂). Infine, tramite questa forzante radiativa, si può calcolare la variazione della temperatura globale ΔGMST, già introdotta in precedenza.

Ekwurzel et al. (2017) utilizzano come input per il modello (si veda materiale supplementare, foglio 10584_2017_1978_MOESM1_ESM.docx) dati di emissioni globali totali, inclusivi di CO₂ (industriali e uso del suolo), altri gas GHG antropici, altre emissioni antropiche e forzanti naturali. Inoltre, le emissioni da CH₄ fornite da Heede (2014b) sono state incluse, ipotizzando una vita media in atmosfera di 9 anni. Il modello è stato utilizzato in due configurazioni, *i.e.* i) con *aerosol* da combustione e ii) senza *aerosol*.

Una volta ottenuta una stima di ΔGMST, si può procedere, tramite l'utilizzo di un ulteriore modello (Kopp et al. 2016), alla valutazione dell'incremento del livello marino globale GSL. Tale modello, anch'esso brevemente analizzato nel seguito, si basa su una lunga serie di dati relativi a ricostruzioni del livello medio marino (*regional/relative* sea level RSL) relativo agli ultimi 3000 anni ed alle temperature corrispondenti e consente di stimare il livello medio marino GSL in funzione della sola temperatura media globale GMST.

Alla disamina specifica dei modelli qui introdotti si procederà come detto nel seguito. Si osservi fin da ora però la circostanza che tali modelli non rappresentano una schematizzazione fisica del sistema terra atmosfera, come ad esempio ottenuto tramite l'utilizzo di modelli di tipo General Circulation Model GCMs, utilizzati da IPCC per la ricostruzione di scenari climatici credibili (IPCC 2021a, WGI). Si tratta invece di modelli di tipo “risposta all'impulso”, ossia modelli concettuali che concentrano l'intera complessità e la risposta del sistema terra in un sistema puntuale, tempo variante, spesso (come ad esempio nel modello FAIR) semplificato tramite una risposta del tipo “serbatoio lineare/non lineare”. Tali strumenti, come detto in precedenza sono stati introdotti allo scopo di fornire scenari indicativi di concentrazione di CO₂ (o CO_{2e}) in risposta a scenari emissivi e, in cascata, tramite ulteriori ipotesi semplificative, della rispettiva evoluzione del clima terrestre (temperature, livello marino, etc..). Tali modelli nascono però con lo scopo di esplorare scenari alternativi a quelli già esplorati nell'ambito degli esperimenti di IPCC (*e.g.* CMIP6), questi ultimi ritenuti significativi per rappresentare le possibili traiettorie evolutive del sistema terra.

Tali scenari alternativi, che possono includere *e.g.* la valutazione della sensitività della risposta terrestre agli *input*, o parametri, oppure l'effetto potenziale di scenari di emissioni differenti, tanto nel futuro, quanto nel passato (ed ecco il caso in questione nel lavoro di Ekwurzel et al., 2017), vengono però simulati dai modelli detti in forma sostanzialmente approssimata, nell'ambito di ipotesi di lavoro ampiamente restrittive rispetto all'effettivo comportamento del sistema terrestre e comunque rispetto alla rappresentazione fornita da modelli di tipo GCM.

Il risultato è una simulazione che fornisce risultati validi su scala globale (valori medi, senza possibilità di discriminazione su base spaziale) e verosimilmente corredati da ampia sensitività alle scelte modellistiche. Si aggiunga che tali modelli sono fortemente *data driven*, ossia richiedono per essere calibrati (*i.e.* per la scelta dei parametri corretti), ampie moli di dati osservati, il più possibile accurati. Questo perché gli elementi del modello (*e.g.* serbatoi, parametri di risposta), non rispondendo in maniera diretta a ipotesi di tipo fisicamente basato, non possono essere determinati a

priori. Modelli di questo tipo soffrono normalmente di elevata sensitività al *set* di dati utilizzato, nonché di problemi di possibile iper-parametrizzazione (*i.e.* con elevato numero di parametri concettuali, rispetto alla quantità e tipologia di dato di validazione disponibile), o comportamento di tipo *behavioral* (*i.e.* quando diverse combinazioni dei parametri forniscono risultati simili rispetto alle variabili di calibrazione, ma risultati differenti/implausibili rispetto ad altre variabili di validazione). Si osservi come il modello FAIR mostri in particolare un numero di parametri elevato (15 parametri, si veda Tabella 1 in Millar et al., 2016). Tali parametri, ampiamente variabili a seconda della procedura di calibrazione condotta, possono comportare variazioni importanti dei risultati finali. Ekwurzel et al. (2017) sembrano basarsi sulla parametrizzazione offerta da Millar et al. (2016), nella colonna “Value-FAIR” della suddetta Tabella 1. Millar et al. (2016) sembrano suggerire che la maggiore fonte di incertezza nel modello possa derivare dalla scelta dei valori della Sensitività climatica all’equilibrio”, *Equilibrium Climate Sensitivity* ECS e della “Risposta Climatica Temporanea”, *Transient Climate Response*, TCR (si veda sezione successiva), come ipotizzato da Ekwurzel et al. (2017). Tuttavia, non vi è dubbio che una mole di parametri così rilevante possa portare a difficoltà nella corretta identificazione dei valori e dei processi corrispondenti.

Tali problematiche possono essere parzialmente risolte confinando su base fisica o statistica l’intervallo di variazione dei parametri, oppure tramite analisi di sensitività, o altre tecniche statistiche. Tuttavia, spesso si osserva una larga sensitività alla scelta dei parametri, che comporta large incertezza nelle valutazioni finali del modello.

Una volta definita la calibrazione “ottimale” del modello (utilizzando cioè i parametri che consentono di rappresentare nella maniera migliore l’andamento dei dati storici), gli autori conducono simulazioni di scenario, rimuovendo ognuno degli emettitori considerati (ossia le emissioni corrispondenti) e valutando la differenza relativa (con/senza tali emissioni) in termini di risposta della CO₂, GMST e GSL.

4.3.3 Il modello FAIR

Il modello FAIR integra il precedente modello AR5-IR. Il modello FAIR si basa su un’equazione di bilancio delle emissioni in un insieme di serbatoi i (qui, $i=1-4$, si vedano gli analoghi serbatoi fisici in Tabella 12 più avanti), così scritta (e derivante da una modifica dell’equazioni iniziale nel modello AR5-IR):

$$\frac{dR_i}{dt} = a_i E - \frac{R_i}{\alpha \tau_i} \tag{Equazione 1}$$

Qui, R_i rappresenta l’anomalia di concentrazione di CO₂ (ppm) in atmosfera, E le emissioni annuali (ppm/anno, con 1 ppm = 2.12 GtC), α_i la frazione di emissioni di carbonio e τ_i la costante di tempo per ogni serbatoio. La Equazione 1 differisce dall’omologa del modello AR5-IR per il solo termine α , introdotto allo scopo di rendere l’efficienza nell’assimilazione del carbonio nei serbatoi, dipendente dallo stato (*i.e.* dal carbonio assimilato nei serbatoi stessi). Le concentrazioni atmosferiche e le relative forzanti radiative si calcolano come:

$$C = C_0 + \sum_i R_i \tag{Equazione 2}$$

e

$$F = \frac{F_2}{\ln(2)} \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) + F_{ext} \quad \text{Equazione 3}$$

Qui, C_0 è il valore di concentrazione pre-industriale, con F_2 la forzante radiativa relativa ad un raddoppio della concentrazione di CO_2 ($F_2 = 3.74 \text{ W/m}^2$) ed F_{ext} una forzante non CO_2 . Come si è detto in precedenza, l'incremento della forzante non è lineare con C , ma ha un andamento di tipo logaritmico (*i.e.* con comportamento di tipo saturante).

L'anomalia di temperatura T (ΔGMST) è data da due componenti (T_j), date dall'equilibrio delle aree oceaniche superficiali e profonde:

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{q_j F - T_j}{d_j}; T = \sum_j T_j; j = 1,2 \quad \text{Equazione 4}$$

Le variabili q_j e d_j sono legate ai parametri "Sensitività climatica all'equilibrio", *Equilibrium Climate Sensitivity ECS*²⁰ e "Risposta climatica temporanea", *Transient Climate Response, TCR* (si veda Eq.4,5 in Millar et al., 2016).

$$ECS = F_2 \cdot (q_1 + q_2) \quad \text{Equazione 5}$$

$$TCR = F_2 \cdot \left(q_1 \left(1 - \frac{d_1}{70} \left(1 - \exp\left[-\frac{70}{d_1}\right] \right) \right) \right) + \left(q_2 \left(1 - \frac{d_2}{70} \left(1 - \exp\left[-\frac{70}{d_2}\right] \right) \right) \right) \quad \text{Equazione 6}$$

Le due equazioni in ECS e TCR possono essere invertite, per calcolare $q_{1,2}$, assumendo che le scale temporali $d_{1,2}$ siano note (si veda Tabella 12 più avanti). Sui valori di ECS e TCR si tornerà comunque nel seguito. Un parametro di interesse legato alla valutazione dell'impatto del budget di carbonio sui bilanci energetici del sistema terrestre ed all'identificazione di indicatori di potenziale per il riscaldamento globale *Global Warming Potential GWP* è la cosiddetta risposta all'impulso integrale su 100 anni, *100-year integrated impulse-response function, iIRF*¹⁰⁰, che si può esprimere nel modello FAIR come:

$$iIRF_{100} = \sum_j \alpha a_i \tau_i \left[1 - \exp\left(\frac{-100}{\alpha \tau_i}\right) \right] \quad \text{Equazione 7}$$

Se si assume che $iIRF$ ¹⁰⁰ sia una funzione dell'accumulo di carbonio nei serbatoi terrestri e marini:

$$C_{acc} = \sum_t E - (C - C_0), \quad \text{Equazione 8}$$

²⁰ "The global mean warming resulting from an instantaneous doubling of preindustrial CO_2 concentrations after allowing the climate system to reach a new equilibrium state". Millar et al. (2016), p. 7215

nonché della temperatura globale, tramite una semplice dipendenza lineare, che fornisce un'approssimazione adeguata delle risposte dei modelli ESM, EMICs, si ottiene:

$$\text{iIRF}_{100} = r_o + r_c C_{acc} + r_T T \quad \text{Equazione 9}$$

La simulazione avviene in modo ricorsivo. Ad ogni *step* temporale si calcola con la Equazione 9 il valore di iIRF^{100} , utilizzando i valori di C_{acc} e T a quel *time step*. Dalla Equazione 7 si ricalcola a ritroso il valore di α più adatto, che viene poi utilizzato per il calcolo del budget di CO_2 con l'Equazione 1. Con l'Equazione 3 si rivaluta la forzante radiativa e finalmente con l'Equazione 4 si aggiorna lo stato termico.

Ovviamente, la scelta dei parametri del modello, qui introdotti, comporta risultati differenti. Il modello si configura in questo senso come un modello di tipo concettuale (poiché utilizza elementi concettuali, quali dei serbatoi lineari per descrivere il comportamento del sistema terra nell'accumulo della CO_2) e *data driven*, poiché i parametri del modello devono essere valutati sulla base di una procedura di calibrazione tramite l'utilizzo di dati osservativi. Tale aspetto introduce evidenti elementi di incertezza e, anche, di soggettività delle scelte, con impatto sui risultati. Su tale aspetto ci si concentrerà in seguito.

4.3.4 Il modello GSL

Il modello GSL (Kopp et al., 2016) viene utilizzato per la valutazione della variazione del livello globale marino, allo scopo di quantificare l'impatto delle emissioni riferite a specifici produttori.

Tale modello si basa su una lunga serie di dati relativi a ricostruzioni del livello medio marino (*regional/relative sea level RSL*) relativo agli ultimi 3000 anni ed alle temperature corrispondenti e consente di stimare il livello medio marino GSL in funzione della sola temperatura media globale GMST. Il modello lega l'innalzamento del livello marino globale GSL alla temperatura media globale GMST.

L'equazione di base del modello fornisce la derivata del livello marino (h), in funzione di perturbazioni relative alla temperatura globale T :

$$\frac{dh}{dt} = a(T(t) - T_o(t)) + c(t)$$

$$\frac{dT_o(t)}{dt} = (T(t) - T_o(t))/\tau_1 \quad \text{Equazione 10}$$

$$\frac{dc(t)}{dt} = c/\tau_2$$

Qui, a rappresenta la sensitività di GSL ad una deviazione delle temperature da un valore di equilibrio, $T_o(t)$, τ_1 rappresenta la scala temporale con la quale la temperatura converge verso il valore di equilibrio e c rappresenta un tasso di variazione tempo indipendente, con tempo di *e-folding* (necessario per una crescita esponenziale di un fattore pari a e) pari a τ_2 . I parametri del modello sono calcolati tramite una procedura del tipo massima verosimiglianza, descritta anche nel materiale di

supporto dello studio. I valori utilizzati in Ekwurzel et al. (2017) sono qui riportati in Tabella 11 più avanti, insieme ai risultati di un'analisi di sensitività condotta dagli autori stessi.

4.3.5 Risultati principali

Ekwurzel et al. (2017) forniscono, in sostanza, stime quantitative dell'impatto delle attività emmissive delle (90) *majors* selezionate su: i) emissioni di CO₂ e variazioni termiche ΔGMST tramite FAIR e ii) livello del mare GSL, tramite il modello GSL (Kopp et al., 2016). Mentre dei valori specifici relativi ad ENI si è già detto in precedenza, si riportano qui (Figura 10) i grafici integrali forniti dagli autori.

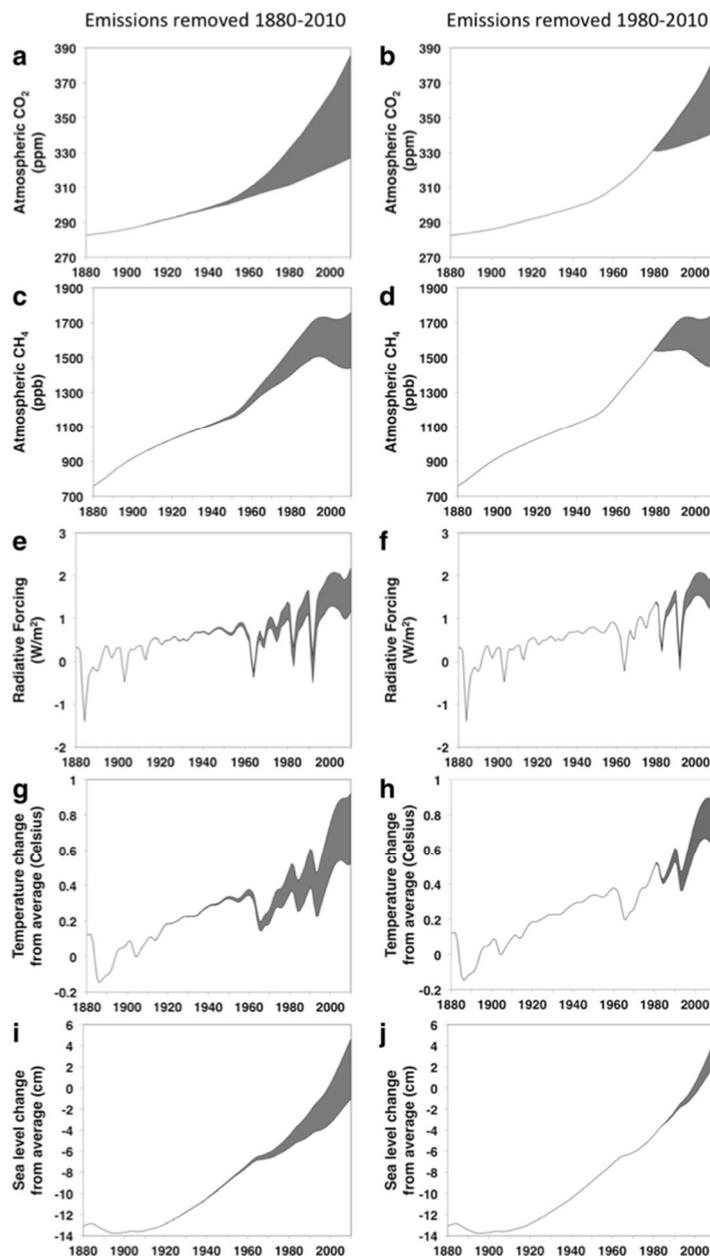


Figura 10 Variazioni di CO₂ (ppm), CH₄ (ppm), forzante radiativa (W/m²), GMST (°C) e livello medio marino GSL (cm) in seguito alla rimozione delle emissioni annuali attribuite ai 90 maggiori produttori di carbonio, a partire dal 1880 (a,c,e,g,i) e dal 1980 (b,d,f,h,j). Le simulazioni sono state condotte utilizzando i parametri best estimate e con le

forzanti storiche complete. Si consulti il materiale supplementare ESM per i risultati relativi ai test di sensitività per ogni produttore. In: Ekwurzel et al. (2017), p. 584

Dal punto di vista globale, gli autori osservano come:

- 1) Rimuovendo le emissioni attribuite alle 90 *majors* individuate dalla simulazione con forzante storica completa (1880-2010), si osserva come la combustione dei prodotti da loro messi sul mercato avrebbe comportato da sola una crescita di 58.8 (± 3) ppm di crescita della CO₂, ossia il 57.0 (± 2.9)% della crescita totale. Tra il 1980 ed il 2010, tali valori ammonterebbero a di 43.8 (± 1.3) ppm di crescita della CO₂, ossia il 42.5 (± 1.3)% della crescita totale.
- 2) Rimuovendo le emissioni attribuite alle 90 *majors* individuate dalla simulazione con forzante storica completa (1880-2010), si osserva come la combustione dei prodotti da loro messi sul mercato avrebbe comportato da sola una crescita di 0.4 (± 0.01) °C di crescita Δ GMST, ossia il 50 (± 1.1)% della crescita totale. Tra il 1980 ed il 2010, tali valori ammonterebbero a di 0.28 (± 0.01) °C e 35.1 (± 0.7)% della crescita totale.
- 3) Rimuovendo le emissioni attribuite alle 90 *majors* individuate dalla simulazione con forzante storica completa (1880-2010), si osserva come la combustione dei prodotti da loro messi sul mercato avrebbe comportato da sola una crescita di +5.7 (± 0.1) cm di Δ GSL, ossia il 32.1(± 0.4)% della crescita totale. Tra il 1980 ed il 2010, tali valori ammonterebbero a di 2.38 (± 0.03)% cm e 13.5 (± 0.2)% della crescita totale.

Nei documenti supplementari, sopra già commentati, gli autori riportano il contributo stimato dei vari produttori, di interesse qui in relazione ad ENI.

4.3.6 Analisi di sensitività

Gli autori conducono un'analisi di sensitività del modello FAIR e dei risultati, rispetto a 3 aspetti:

- 1) Sensitività climatica;
- 2) Mancanza di dati su *aerosol* da combustione, tracciabili ai diversi emettitori;
- 3) Ordine di rimozione delle emissioni.

Il test relativo alla sensitività climatica esplora la variazione della risposta modellistica in funzione della scelta di alcuni parametri chiave del modello, denominati “Sensitività climatica all’equilibrio”, *Equilibrium Climate Sensitivity ECS*²¹ e “Risposta climatica temporanea”, *Transient Climate Response, TCR*²². I valori utilizzati derivano in sostanza dal lavoro di Millar et al. (2016)²³, mentre il *range* plausibile scelto da Ekwurzel et al. (2017), a sua volta indicato da Millar et al. (2016) fa capo all’AR5 di IPCC (WGI). A titolo di esempio, si osservi come il parametro *ECS* (incremento di temperatura media Δ GMST all’equilibrio in risposta ad una concentrazione di CO₂ raddoppiata) varia

²¹ “The global mean warming resulting from an instantaneous doubling of preindustrial CO₂ concentrations after allowing the climate system to reach a new equilibrium state”. Millar et al. (2016), p. 7215

²² “The global mean warming at the time of doubled CO₂ concentrations following a 1 % year⁻¹ increase from preindustrial values”. *Ibidem*

²³ “We choose default values for q_j corresponding to $TCR=1.6K$ and $ECS=2.75K$ ($q_1=0.33KW^{-1}m^2$ and $q_2 = 0.41 KW^{-1} m^2$), indicative of a typical mid-range climate response to radiative forcing in ESMs (Flato et al, 2013)”. *Ibidem*

da un valore basso/low (1.5 °C) ad un valore alto/high (4.5 °C) secondo il report AR5 (IPCC 2013, WGI, *high confidence range*). Non sembra invece specificato il processo di scelta del *range* ipotizzato per il parametro *TCR*, verosimilmente comunque derivante anch'esso da IPCC (2013, WGI). I valori utilizzati sono qui riportati in Tabella 10.

Si osservi, come verrà spiegato in seguito nell'analisi di dettaglio dei modelli utilizzati qui, che secondo le ipotesi del modello FAIR, la risposta atmosferica in termini di accumulo di CO₂ influenza la forzante radiativa terrestre, che influenza a sua volta la temperatura media terrestre. Tale temperatura impatta poi la dinamica di accumulo di CO₂ (tramite la capacità di accumulo nei "serbatoi ambientali), configurando quindi una situazione di *feedback*. Per tale motivo, la definizione dei parametri *ECS* e *CTR* è fondamentale, poiché tali parametri, di fatto regolano la simulazione modellistica dei tre fenomeni base per la risposta terrestre alle emissioni, ossia l'aumento di concentrazione di CO₂, la forzante radiativa in risposta alla CO₂ stessa, nonché le variazioni di temperatura seguenti (che di nuovo impattano la CO₂ atmosferica).

Riguardo gli *aerosol*, gli autori scrivono che non è possibile ricostruire alla data delle loro valutazioni, il contributo in termini di *aerosol* da combustione di ogni emettitore. Per valutare il contributo di tale aspetto sull'incertezza dei risultati, gli autori riportano di avere condotto 4 tipi di simulazioni, *i.e.* con i) forzante storica completa (tutte le forzanti naturali ed antropiche), ii) forzante storica completa meno le forzanti antropiche delle *majors* (CO₂, CH₄), iii) forzante storica completa meno *aerosol* da combustione totali e iv) forzante storica completa meno le forzanti antropiche delle *majors* (CO₂, CH₄) e meno *aerosol* da combustione totali. In Tabella 7, Tabella 8 e Tabella 9, fornite in sede di commento dei valori riportati in citazione, l'effetto di tale incertezza è già stato evidenziato e commentato.

Dal punto 3, come detto sopra, vediamo come gli autori scelgano, tra i metodi possibili sopra riportati (Trudinger et al., 2005) per l'analisi di tipo *SA* il metodo *NR*, *leave one out*. Come detto in precedenza, tale metodo difetta in termini di consistenza additiva e, come anche riconosciuto dagli autori, presenta una evidente sensibilità all'ordine di rimozione dei contributi emissivi. Gli autori qui simulano due differenti scenari, escludendo le emissioni di ogni emettitore per primo o per ultimo (*i.e.* a monte o a valle dell'inclusione del set di emissioni rimanenti, a meno di quelle dell'emettitore).

In Tabella 10 si riporta il *range* dei valori utilizzati dei 2 parametri, insieme al valore *Best* (*i.e.* che fornisce in miglior adattamento al dato osservato).

Thermal Settings	Low	High	Best
TCR	1	2.5	1.6
ECS	1.5	4.5	2.75
Adjustment to non-GHG forcing	-1.1	0.65	0

Tabella 10 Parametri termici utilizzati per analisi di sensibilità del modello FAIR (in Ekwurzel et al., 2017, materiale supplementare, 10584_2017_1978_MOESM1_ESM.docx). I valori di 'Adjustment to non-GHG forcing' sono presi dai valori "verosimili" relative alle forzanti antropiche riportati nel WGI SPM (di AR5 di IPCC, ndr) (riportato in: 10584_2017_1978_MOESM3_ESM.xlsm, materiale supplementare di Ekwurzel et al. 2017).

La sensibilità del modello GSL viene anch'essa testata, facendone variare i parametri più significativi, come si veda nella Tabella 3 del file supplementare, qui riprodotta in Tabella 11.

Nelle Figure 3, 4 e 5 si riportano i risultati delle simulazioni condotte con FAIR, inclusive dei risultati dell'analisi di sensibilità. Si mostrano sia le simulazioni relative alla concentrazione di CO₂, sia quelle relative alle temperature GMST, insieme a quelle relative al livello marino GSL.

Parameter	Low	High	Best
a	0.34	0.70	0.47
τ_1	64	203	102
c (2000)	0.001	0.006	0.003
c timescale	1124	16155	3392

Tabella 11 Parametri del modello GSL utilizzati per analisi di sensitività del modello FAIR (in Ekwurzel et al., 2017, materiale supplementare, 10584_2017_1978_MOESMI_ESM.docx). Il parametro a rappresenta il tasso di sensitività ad una deviazione della temperatura da un valore di equilibrio. τ_1 è un parametro temporale di scala per il raggiungimento della temperatura di equilibrio. I parametri c rappresentano costanti delle regressioni del modello (Kopp et al. 2016).

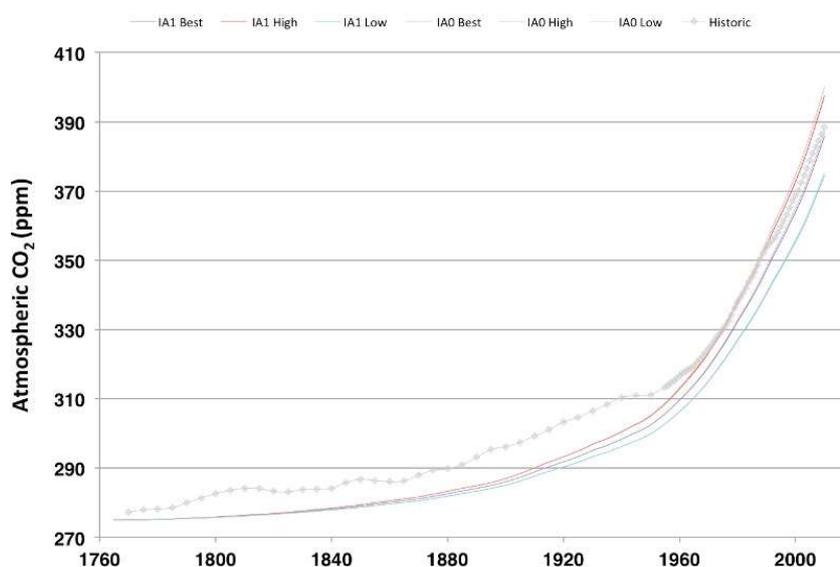


Figura 11 Concentrazioni atmosferiche simulate di CO₂. Analisi di sensitività. Caso di riferimento (nessuna rimozione delle emissioni). Si paragonano i risultati del modello con i valori storici degli indicatori climatici forniti dalla U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). Significato delle traiettorie: IA1 = forzante completa, con aerosol da combustione; IA0 = forzante completa meno aerosol da combustione storici; Best, High, Low, valori dei parametri in Tabella 10 qui. In: 10584_2017_1978_MOESMI_ESM.docx

I risultati dell'analisi di sensitività mostrano aspetti interessanti, qui esposti in relazione alle diverse tematiche.

Parametri di sensitività climatica. Si osserva *in primis* una forte dipendenza dei risultati dalla scelta dei parametri ECS e TCR , prima menzionati, che come spiegato influenzano tutti i processi base modellati da FAIR.

Nei grafici in Figura 11 e Figura 12 si osserva la risposta del modello in termini di concentrazioni atmosferiche simulate di CO₂ e di risposta termica media, GMST. Benché gli autori non commentino di fatto i risultati, né forniscano valori tabellati, si osserva chiaramente come nell'intero periodo di simulazione (1760-2010) differenti ipotesi sugli aerosol (A0/A1, meno aerosol/con aerosol) e sui parametri detti (*Low/Best/High*) comportino rilevanti deviazioni dalle simulazioni "ottimali" e soprattutto dalle serie storiche.

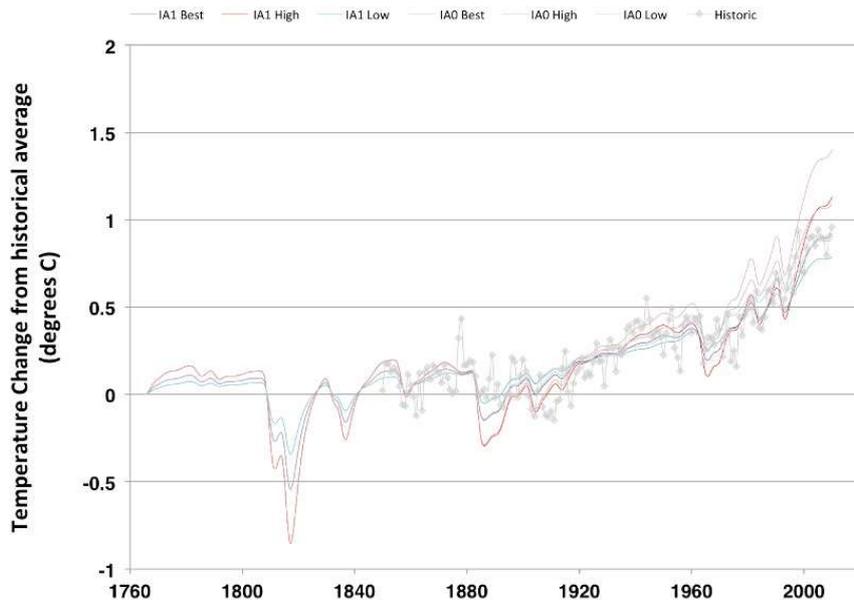


Figura 12 Variazioni simulate di GMST. Analisi di sensitività. Caso di riferimento (nessuna rimozione delle emissioni). Si paragonano i risultati del modello con i valori storici degli indicatori climatici forniti dalla U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). Significato delle traiettorie: IA1 = forzante completa, con aerosol da combustione; IA0 = forzante completa, meno aerosol da combustione storici; Best, High, Low, valori dei parametri in Tabella 10 qui. In: 10584_2017_1978_MOESMI_ESM.docx.

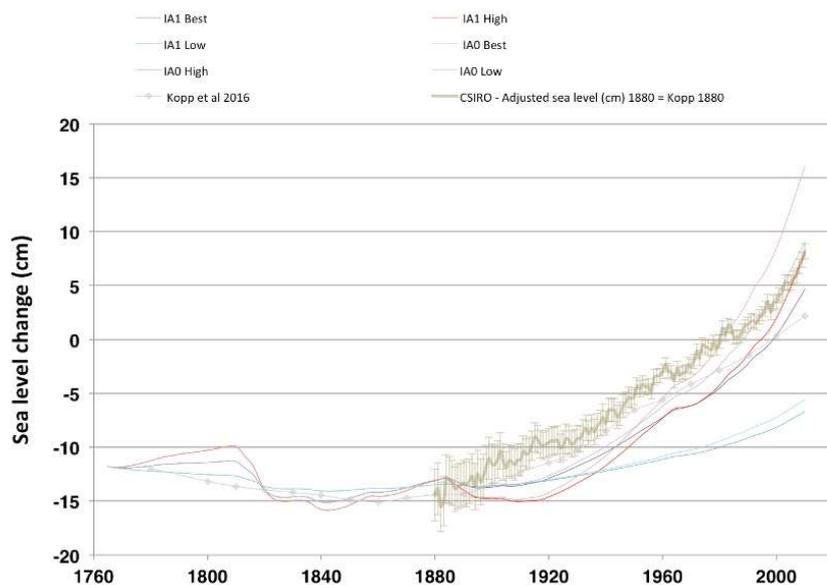


Figura 13 Variazioni simulate di GSL. Analisi di sensitività. Caso di riferimento (nessuna rimozione delle emissioni). Si paragonano i risultati del modello con i valori storici degli indicatori climatici forniti dalla U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). Significato delle traiettorie: IA1 = forzante completa, con aerosol da combustione; IA0 = forzante completa, meno aerosol da combustione storici; Best, High, Low, valori dei parametri in Tabella 11 qui. In: 10584_2017_1978_MOESMI_ESM.docx.

Tutte le simulazioni relative alla CO₂ mostrano un forte *offset* rispetto alle serie storiche per un lungo periodo iniziale (ca. 1760-1950), che viene in qualche modo “recuperato” in seguito (ca. 1950-2010), chiaramente in seguito ad un forte irripidimento (aumento della derivata) della risposta atmosferica dopo il 1950. Tale circostanza sembra interessante, poiché indica come, verosimilmente, il modello, almeno nella configurazione (ipotesi e parametri) applicata, abbia due regimi di comportamento, *i.e.*

i) un primo regime in cui la risposta della CO₂ è fortemente sottovalutata e ii) un secondo regime in cui la risposta viene invece sopravvalutata (forte cambio di pendenza) e le differenze accumulate vengono appianate. Sembra quindi potersi dire che il risultato finale “corretto” discenda da una composizione di due regimi “non corretti” o quantomeno “imprecisi”. Tale circostanza sembrerebbe suggerire, per esempio, la necessità di una differente parametrizzazione, forse anche in senso CO₂-dipendente.

In seguito, quando la curva “best” (o meglio, le due curve *best*, nelle due ipotesi A0/A1, senza/con *aerosol*) comincia ad uniformarsi allo storico (1965-2010), si osserva come le curve *Low/High* mostrino una forte divergenza, con un range dell’errore (al 2010) che varia, rispetto al valore “corretto” pari a ca. 390 ppm, tra i ca. 375 (casi *Low*, A0/A1) ed i 405 (casi *High*, A0/A1).

L’ovvia conseguenza di tale variabilità, si riflette nelle stime di variazione della temperatura media Δ BMST (Figura 13), che mostra una variabilità (al 2010) tra ca. +0.75 °C e +1.3 °C (valore *best* ca. +0.9 °C, simile allo storico).

Anche le stime del (aumento del) livello marino Δ GSL (Figura 15, al 2010) risentono notevolmente dei parametri scelti, con valori compresi tra -7 cm e +10 cm, a fronte di un valore *best* di ca. 5 cm. Si osservi che il valore “osservato” (CSIRO) si attesta intorno agli 8.5 cm. Non è chiaro dal testo quali valori si siano utilizzati rispetto ai parametri del modello GSL (qui in Tabella 11), anche se sembra logico assumere che si siano assunti i valori *Low/Best/High* in concomitanza con i valori del modello FAIR.

Riguardo alla scelta dei parametri FAIR (e GSL), è ovvia l’osservazione che i valori ottimali derivano da una operazione di selezione da letteratura.

Sorgono spontanee alcune considerazioni:

- 1) I parametri *best* scelti derivano da simulazioni condotte in letteratura, tramite altri modelli e con specifiche ipotesi/scelte strategiche (e.g. sulla quantità e dinamica delle emissioni e sulla scelta delle emissioni da considerare). Non è chiaro qui se utilizzando gli stessi parametri per il modello FAIR e con differenti scelte strategiche tali valori siano ancora adatti.
- 2) Se la scelta di parametri “ottimali” basati sulle ipotesi dette, che in qualche modo interpreta la risposta alla globalità delle emissioni, influenzi in qualche modo il risultato in termini di attribuzione specifica.
- 3) Gli autori non propongono alcuna attività di calibrazione/validazione su set di dati differenti (e.g. prima/dopo, ipotesi A0/A1), magari con una prospettiva di tipo statistico (*jackknife* o *bootstrap*). Tale circostanza sembra rendere statisticamente debole la scelta dei parametri. Le forti differenze osservate nel periodo “iniziale” (1760-1960, quasi 200 anni) potrebbero far pensare alla necessità di diverse parametrizzazioni in risposta a valori differenti degli input o delle variabili di stato.
- 4) Eventuali simulazioni di scenario futuro sarebbero robuste, data l’incertezza delle ipotesi e della possibile variabilità dei parametri quando si considerino valori differenti degli input?

Particolarmente significativa sembra la scelta relativa agli *aerosol*. Gli autori non sembrano fornire indicazioni su eventuali variazioni dei parametri di calibrazione (*ECS-TCR*) rispetto ai due casi A0/A1, da loro di fatto ipotizzati sulla base delle simulazioni di Millar et al. (2016). E’ tuttavia evidente che, data la differenza nell’*input* in termini di forzanti attese (si veda la Tabella 7, riga *Model reference atmospheric carbon dioxide (CO₂) rise 1880-2010 (ppm)*), si potrebbe ipotizzare una

variazione della risposta in termini di CO₂, con possibile variazione dei parametri ottimali *ECS-TCR*, che vengono invece tenuti qui fissi ai valori di Millar et al. (2016).

Un ulteriore aspetto riguarda l'intervallo dei parametri utilizzati per il modello FAIR. Ekwurzel et al. (2017) basano l'utilizzo di FAIR su una precedente calibrazione di Millar et al. (2016), a sua volta basata su risultati presentati da Joss et al. (2013).

Joss et al. (2013) conducono un esperimento atto a valutare la cosiddetta funzione di "Risposta all'impulso emissivo" dei modelli climatici.

Tale risposta indica, in sostanza, il comportamento nel tempo della concentrazione di CO₂ ed eventualmente di altre variabili (tipicamente la temperatura media dell'atmosfera GMST), in risposta all'immissione (modellistica) di una quantità nota di CO₂, in un tempo finito (o istantanea).

Qualunque modello di tipo climatico, di ogni livello di complessità, che fornisca una simulazione accoppiata del ciclo del carbonio atto a valutare i) le concentrazioni di CO₂ in atmosfera e ii) le variazioni di temperatura globali, dovrebbe essere in grado di riprodurre tale risposta all'impulso in maniera corretta.

FAIR, il modello utilizzato da Ekwurzel et al. (2017) appartiene alla categoria di modelli climatici di tipo "semplice", a volte indicati con l'acronimo EMICS, *Earth system Models of Intermediate Complexity* (ossia modelli che simulino il comportamento dell'atmosfera tramite ipotesi e schemi semplificati), in contrasto con modelli di tipo ESM, *Earth System Models*, che simulano il sistema terra tramite la soluzione numerica delle equazioni della dinamica su una griglia tridimensionale completa.

Più precisamente, come detto in precedenza, FAIR ricade nella gamma dei modelli detti del tipo "risposta all'impulso", *impulse-response IR*, semplificati, sviluppati nel solco del modello IPCC AR5-IR, e pensati per rapide simulazioni di sensitività del sistema terra-atmosfera a scenari di dinamiche emissive non standard, ossia non ricadenti nei cosiddetti scenari emissivi IPCC (RCP in AR5 e SSP in AR6). Tali modelli ovviamente brillano per rapidità di implementazione ed esecuzione, a scapito tuttavia di risultati distribuiti spazialmente e della simulazione completa dei processi atmosferici (tipicamente, con simulazione della "sola" dinamica della CO₂ media e temperatura media).

Ovviamente, tale modello, come tutti i modelli ESM, EMIC, IR deve, almeno in linea di principio, simulare in maniera corretta la risposta impulsiva prima introdotta.

Joss et al. (2013) si concentrano sulla "Risposta all'impulso emissivo" per un certo numero di modelli di tipo ESM/EMICS, ottenuta sulla base di una "call" per l'esperimento IRFCO₂, *Impulse Response Function CO₂*.

Sulla base dei risultati forniti tramite simulazioni (in base ad uno specifico protocollo) da 15 modelli climatici, Joos et al. (2013) forniscono le funzioni di risposta all'impulso per vari livelli di impulso (GtC) e per varie condizioni iniziali (presente, *i.e.* 389 ppm CO₂, pre-industriale).

Millar et al. (2016) di fatto implementano e calibrano il modello FAIR sulla base dei risultati di Joos et al. (2016), in particolare in relazione a due esperimenti, detti PD100 e PI100.

Tali esperimenti comportano: i) PD100, l'introduzione modellistica (*pulse*, istantanea) in atmosfera di 100 GtC, in condizioni presenti (389 ppm); ii) PI100, l'introduzione modellistica (*pulse*, istantanea) in atmosfera di 100 GtC, in condizioni pre-industriali (ca. 280 ppm, ndr).

In particolare, i parametri del modello (a_i, r_0, r_C, r_T) vengono scelti per minimizzare la somma degli scarti quadratici rispetto al valore medio delle simulazioni delle traiettorie di CO₂ fornite da Joos et al. (2013) nei due scenari PD100 e PI100. Si vedano i parametri “ottimali”, riportati qui in Tabella 12. Si noti che i parametri τ_i, q_i, d_i , vengono presi da letteratura (IPCC, 2013).

In Tabella 12, si osserva immediatamente come, in dipendenza dai diversi modelli considerati, i parametri riportati possono cambiare, benché non in maniera eclatante. Tale circostanza indica certamente una dipendenza dei parametri dal modello definito e mostra chiaramente come i modelli di tipo risposta all’impulso siano di fatto modelli *data driven*, ossia con base fisica approssimata e con necessità di calibrazione in base ai dati (e probabile variabilità dei parametri relativa).

Parameter	Value – AR5-IR	Value – PI-IR	Value – FAIR	Guiding analogues
a_0	0.2173	0.1545	0.2173	Geological re-absorption
a_1	0.2240	0.1924	0.2240	Deep ocean invasion/equilibration
a_2	0.2824	0.2424	0.2824	Biospheric uptake/ocean thermocline invasion
a_3	0.2763	0.4108	0.2763	Rapid biospheric uptake/ocean mixed-layer invasion
τ_0 (year)	1×10^6	1×10^6	1×10^6	Geological re-absorption
τ_1 (year)	394.4	276.7	394.4	Deep ocean invasion/equilibration
τ_2 (year)	36.54	30.75	36.54	Biospheric uptake/ocean thermocline invasion
τ_3 (year)	4.304	4.459	4.304	Rapid biospheric uptake/ocean mixed-layer invasion
q_1 (KW ⁻¹ m ²)	0.33	0.33	0.33	Thermal equilibration of deep ocean
q_2 (KW ⁻¹ m ²)	0.41	0.41	0.41	Thermal adjustment of upper ocean
d_1 (year)	239.0	239.0	239.0	Thermal equilibration of deep ocean
d_2 (year)	4.1	4.1	4.1	Thermal adjustment of upper ocean
r_0 (year)	–	–	32.40	Preindustrial iIRF ₁₀₀
r_C (year GtC ⁻¹)	–	–	0.019	Increase in iIRF ₁₀₀ with cumulative carbon uptake
r_T (year K ⁻¹)	–	–	4.165	Increase in iIRF ₁₀₀ with warming

Tabella 12 Parametri di default utilizzati per la modellazione semplificata tramite risposta all’impulso semplificata del ciclo del carbonio e clima. In: Millar (2016).

Millar et al. (2016) propongono altresì un’analisi di sensitività ai parametri del modello, verificando la risposta ad una immissione di 100 GtC nel 2020 (con concentrazioni di *background* RCP2.6) tramite un *ensemble* (300 membri) di simulazioni, in cui i parametri più influenti (TCR, che ingloba q_i e d_i TCR/ECS = RWF, d_2, r_0, r_C, r_T) vengono estratti in maniera casuale da distribuzioni statistiche coerenti (con *range* di valori IPCC 2013).

I risultati (qui riportati graficamente in Figura 14) mostrano aspetti interessanti. In Figura 14b, si osserva la risposta del modello FAIR ad uno scenario di crescita di concentrazione dell’1%/anno (per circa 150 anni, partendo da ca. 280 pmm CO₂), anch’esso utilizzato in letteratura come test per la risposta di modelli ESM, EMICS, IR (Arora et al., 2013). I risultati di FAIR, perturbati tramite estrazione casuale dei parametri come detto, forniscano un *range* (approx. 5-95%) per il parametro TCRE (risposta temporanea a emissioni cumulative, *transient climate response to cumulative emissions*), tra 1.0-2.5 Kt°C⁻¹, simile al *range* fornito da IPCC AR5. Tale parametro indica in sostanza la risposta termica *standard* per il sistema terrestre ad uno scenario di crescita emissiva costante. Come si osserva qui, la stima di tale parametro mostra un intervallo di variazione relativamente largo (1.5 °C, in assoluto maggiore del valore stimato ad oggi di Δ GMST) e, nel modello FAIR, tale intervallo di variazione, dipende ampiamente dalla scelta dei parametri. L’argomento che tale variabilità sia coerente con le stime multi-modellistiche di IPCC A5, ulteriormente dimostra come l’attuale conoscenza della risposta del sistema terra, benché nota in forma qualitativa, mostra ancora incertezze quantitative notevoli. Nella Figura 14c si mostra la risposta termica ad un impulso di 100 GtC emesso nel 2020, con *background* RCP2.6. Si osservi

anche qui un ampio *range* di risposta termica, in risposta alla perturbazione dei parametri. Nel periodo temporale seguente all'impulso (fino a 200 anni), la risposta del sistema comporta un incremento termico variabile tra ca. 0.1°C - 0.4 °C (benché per poche simulazioni si osservino valori >0.2), con una mediana di ca. +0.16 °C.

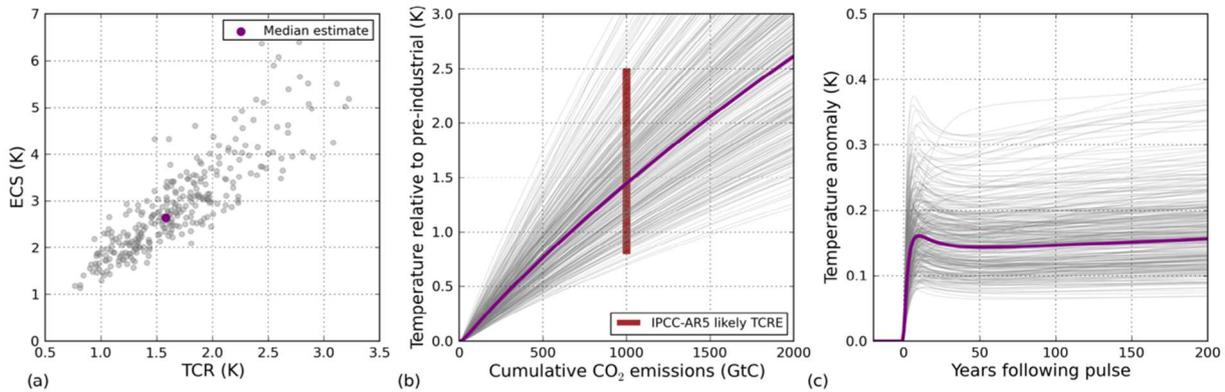


Figura 14 Analisi di sensitività ai parametri di FAIR. Le linee grigie indicano la risposta del modello alla simulazione condotta tramite estrazione casuale (300 simulazioni) dei parametri del modello, come descritto nel testo. (a) distribuzione congiunta dei parametri TCR ed ECS. (b) risposta termica relativa allo scenario di crescita di concentrazione dell'1%/anno. La barra marrone indica il range verosimile di TCRE (risposta temporanea a emissioni cumulative, transient climate response to cumulative emissions) secondo IPCC AR5. (c) Risposta termica ad un impulso di 100 GtC emesso nel 2020, con background RCP2.6. I punti (a) e linee (b) viola forniscono la mediana delle distribuzioni. In: Millar et al. (2016), p. 7225.

Millar et al. (2016) forniscono ulteriori elementi in relazione all'incertezza insita nell'utilizzo del modello FAIR.

In Figura 15 (presa dalla Figura 7 in Millar et al., 2016), gli autori mostrano un'analisi di sensitività ai soli parametri della risposta termica del modello, TCR ed ECS, che, come si è ampiamente illustrato sono verosimilmente i parametri di più complessa valutazione.

La Figura 15a mostra ancora la risposta termica allo scenario di crescita di concentrazione dell'1%/anno. La barra verde indica il *range* plausibile dei valori di TCR in IPCC AR5. Lo sfondo blu (a e b) indica la risposta di FAIR nell'ambito dei valori plausibili dei parametri TCR ed ECS secondo IPCC A5 (TCR: 1.0-2.5 K; ECS: 1.5-4.5 K). Ancora, gli autori commentano come “la risposta termica del modello ricopre l'intero *range* delle simulazioni ottenute dagli ensemble CMIP5, nell'ambito dell'incertezza parametrica riprodotta”. Tale incertezza si ripercuote in una stima del Δ GMST tra +2 K(°C) e +5.5 K(°C) a fine esperimento (ca. 150 anni). La Figura 15d mostra il relativo riscaldamento in risposta alle emissioni cumulative nello scenario 1%/anno. La Figura 15b mostra la risposta ad un cambio istantaneo di un fattore 4 della CO₂ atmosferica, mantenuta costante in seguito. Anche in questo caso, le simulazioni ricoprono l'intero *range* IPCC AR5, con un Δ GMST (a 300 anni) tra +2.5 K (°C) e +8 K(°C), comunque con attenuazione della risposta dopo i primi 50 anni circa (Δ GMST +2.5 K (°C) e +6 K(°C)). Nella Figura 15c, sono riportate le concentrazioni di CO₂ in funzione di emissioni cumulative nello scenario del 1%/anno, come si vede anch'esse soggette ad *range* di variazione dell'ordine del 20% (1000-1200 ppm) a fine periodo.

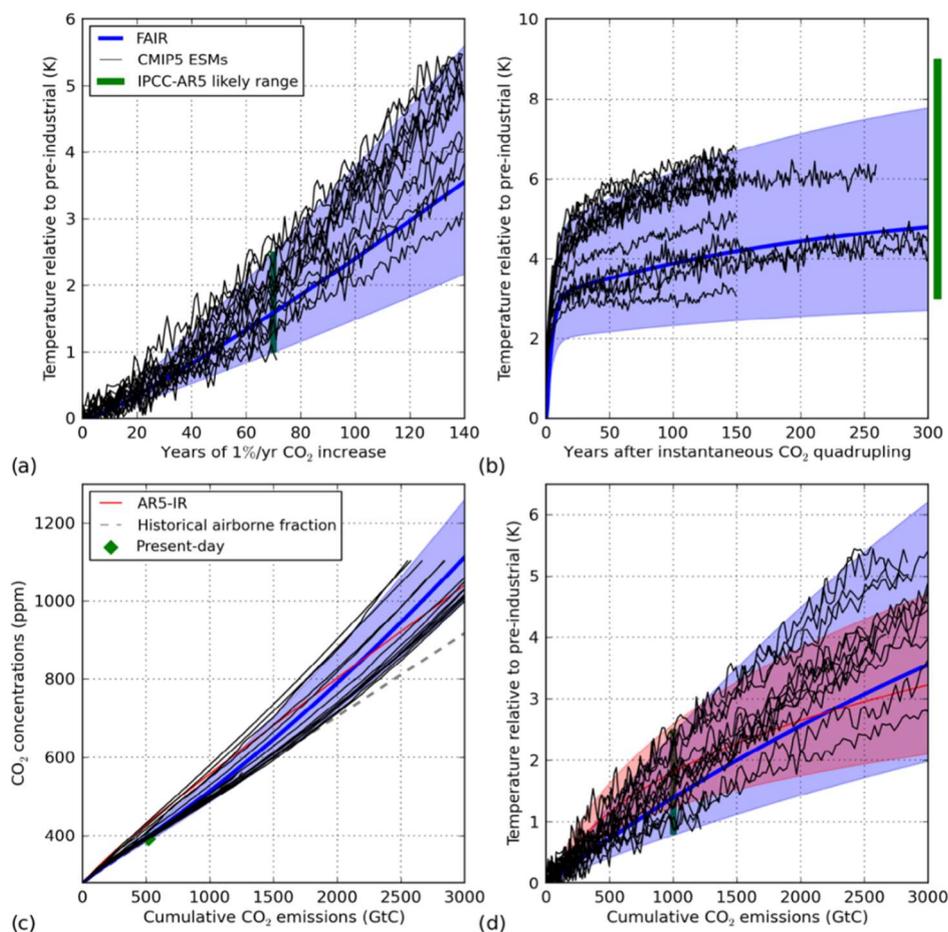


Figura 15 Incertezza nella risposta climatica di FAIR (blu), AR5-IR (rosso) e modelli CMIP5 (AR5 ndr, nero). (a) Risposta termica ad uno scenario di crescita di concentrazione dell'1%/anno. La barra verde indica il range plausibile dei valori di TCR in IPCCAR5. Lo sfondo blu (a e b) indica la risposta di FAIR nell'ambito dei valori plausibili dei parametri TCR ed ECS secondo IPCC A5. (b) Risposta ad un cambio istantaneo di un fattore 4 della CO₂ atmosferica, mantenuta costante in seguito. La barra verde indica il riscaldamento all'equilibrio compatibile con il range plausibile IPCC AR5 ECS. (c) Concentrazioni in funzione di emissioni cumulative nello scenario del 1%/anno. I plume (c, d) mostrano la risposta simulata da FAIR nello scenario con TCR ECS nei range IPCC AR5, con una ulteriore variazione del $\pm 13\%$ di r_p , r_T , and r_C nel range di risposta high/low. Le linee tratteggiate mostrano una frazione aerea costante e cumulative, consistente con lo stato attuale del sistema climatico (losanghe verdi). (d) Riscaldamento in risposta ad emissioni cumulative nello scenario 1%/anno. La barra verde mostra il range verosimile per IPCC AR5, $0.8-2.5\text{KtC}^{-1}$, valutato per la risposta temporanea a emissioni cumulative (TCRE). In: Millar et al. (2016), p. 7224.

A proposito del tema relativo alla valutazione dei parametri TCR ed ECS, a pag. 7217 dell'articolo di Millar et al. (2016) gli autori scrivono che “come vincolo per l'adattamento (dei parametri per la simulazione del ciclo del carbonio, ndr), si impone costante il rapporto tra r_T ed r_C al valore definito dai parametri di default.... Questo serve per ridurre il numero di parametri liberi nel processo di calibrazione (il modello è mal vincolato poiché gli esperimenti di risposta all'impulso non distinguono tra risposte nel ciclo del carbonio indotte dalla temperatura e indotte dall'assimilazione di CO₂) ...”²⁴

²⁴ “As a constraint on this fit, we fix the ratio between the r_T and r_C parameters at the value of this for the default parameters given in Table 1. This is both to reduce the number of free parameters in the fitting process (the model is under constrained as pulse-response experiments do not distinguish between temperature-induced and CO₂ uptake-induced carbon-cycle feedbacks)..” Millar et al. (2016), p. 7217.

Tale affermazione, che pare a chi scrive frutto di una scelta arbitraria, mostra in ogni caso come il modello utilizzato i) mostri una debolezza in termini di risposta fisica del sistema e ii) soffra di una forte dipendenza dalla scelta dei parametri e delle ipotesi ivi contenute, come mostrato nelle analisi qui riportate.

Si noti che Ekwurzel et al. (2017), nel valutare le possibili incertezze contenute nelle valutazioni condotte con FAIR, conducono un'analisi di sensitività con focus su: i) ECS e CTR, tramite utilizzo di valori *high/low/best* (comunque non calibrati ad hoc, ma ripresi da Millar et al., 2016); ii) Mancanza di dati su *aerosol* da combustione, tracciabili ai diversi emettitori (ma senza ri-calibrazione del modello o modifica dei parametri; iii) Ordine di rimozione delle emissioni (primo-ultimo, senza ulteriori posizioni intermedie, anche in considerazione dei differenti periodi emissivi tra diverse *majors*).

Tuttavia, gli autori non compiono alcun tipo di verifica rispetto ai vari parametri del modello soggetti a calibrazione/incertezza (almeno a_i , r_0 , r_C , r_T , come suggerito da Millar et al., 2016). Né gli autori conducono alcuna valutazione probabilistica, come fatto da Millar et al. (2016).

Si rimarca qui la grande variabilità della risposta di FAIR, qui documentata in relazione a specifici *pattern* emissivi *standard* per la valutazione della risposta impulsiva. E' verosimile che tale variabilità si rifletta nell'utilizzo del modello per qualunque *pattern* emissivo, ad esempio quelli relativi alle *majors* utilizzati per le valutazioni di Ekwurzel et al. (2017).

E' lecito quindi chiedersi come tale variabilità si possa riflettere in una valutazione (dell'affidabilità) dei risultati del lavoro di Ekwurzel et al. (2017), atto ad attribuire ad alcune specifiche quote emissive, sostanzialmente oggettive, benché con qualche livello di incertezza (come visto dell'ordine del $\pm 10-15\%$), delle "responsabilità" rispetto ai processi fisici, come si è visto molto più incerte in maniera intrinseca e con forte amplificazione dei *range* plausibili.

4.4 Licker et al. 2019

4.4.1 Metodi

Nell'Atto viene menzionato, anche qui senza apparentemente includere una citazione esplicita, il lavoro di Licker et al. (2019). In tale lavoro *peer reviewed*, gli autori di fatto estendono il lavoro di Ekwurzel et al. (2017), che infatti diversi autori dello studio condividono, ad un esercizio di *SA* specifica rispetto al gruppo di (88) *majors* fra quella già studiate da Heede (2014b, produzione annuale $Pr > 8$ MtC/anno), con riguardo al parametro pH oceanico. Gli autori utilizzano gli *output* dello studio di Ekwurzel et al. (2017) riguardo all'incremento delle temperature, utilizzate come forzanti base per la variazione di pH. I periodi di riferimento sono due, 1880-2015 e 1965-2015 (con alcuni aggiornamenti del precedente data base, fermo al 2010).

Gli autori conducono un certo numero di prove di sensitività rispetto alla configurazione delle forzanti emissive (forzanti totali, A0, rimozione degli *aerosol* da combustione, A1, differenti ipotesi sulla risposta termica temporanea, sensitività climatica ed altri parametri).

La valutazione si basa sull'evidenza che, in senso medio, le variazioni del pH degli oceani seguono in maniera proporzionale e rapida le variazioni di CO₂ atmosferica, riflettendo i processi di equilibrio atmosfera-oceani e la termodinamica della CO₂ negli oceani.

Sulla base di lavori di letteratura, gli autori legano quindi il pH con le concentrazioni di CO₂ tramite la:

$$pH = -3.671 \cdot \log_e(pCO_2) + 10.233 , \quad \text{Equazione 11}$$

con la pressione parziale di CO₂, pCO₂ misurata in micro-atmosfera. Tale equazione si ritiene sufficientemente valida per un *range* di temperature tra 5-45 °C.

Sebbene le valutazioni del modello FAIR siano globali, gli autori qui studiano variazioni (regionali) della chimica marina, utilizzando il modello Community Earth System Model (CESM version 1.1.2_LENS). Tale modello consente simulazioni di tipo 3D e consente di identificare aree di disequilibrio chimico oceano-atmosfera, in base alla modellazione di forzanti biogeochimiche e degli scambi finiti di gas oceano-atmosfera.

Gli autori definiscono cinque aree (regioni, si veda la Figura 5 in Licker et al., 2019), per le quali valutano il livello di acidificazione, tramite il livello di pH superficiale ed il livello di saturazione dell'Aragonite (un minerale utilizzato dagli organismi acquatici, che altresì aiuta a contenere il livello di acidità, prevenendo la dissoluzione dei carbonati di origine biogenica, la cui saturazione dipende dalla CO₂ marina), calcolato dal modello 3D.

Tramite rimozione successiva dei contributi inquinanti dalle varie *majors* considerate (metodo *leave one out*), gli autori associano ad ognuna di tali *majors* un contributo percentuale rispetto alla variazione (diminuzione) del livello del pH in ognuna delle regioni dette, nonché in forma globale.

4.4.2 Risultati principali

In Figura 16 sono riportati i risultati principali di Licker et al. (2019), ossia i grafici che mostrano le stime della diminuzione del pH storica, considerando le forzanti antropiche e naturali e nell'ipotesi di rimozione delle *majors*, per il 1880–2015 e per il 1965–2015.

Gli autori suggeriscono che, nel periodo 1880–2015, le emissioni delle 88 *majors* considerate, avrebbero fornito il 60.8(±4.4)% della crescita di CO₂ in atmosfera. Nel periodo 1965–2015, tale percentuale si attesterebbe al 56.5(±3.6)% della crescita di CO₂ in atmosfera. Di conseguenza il 55.3(±2.0)% ed il 51.0 (±1.9)% della diminuzione del pH superficiale (1880–2015) si possono attribuire alle emissioni, 1880–2015 e 1965–2015, rispettivamente, dalle *majors* scelte.

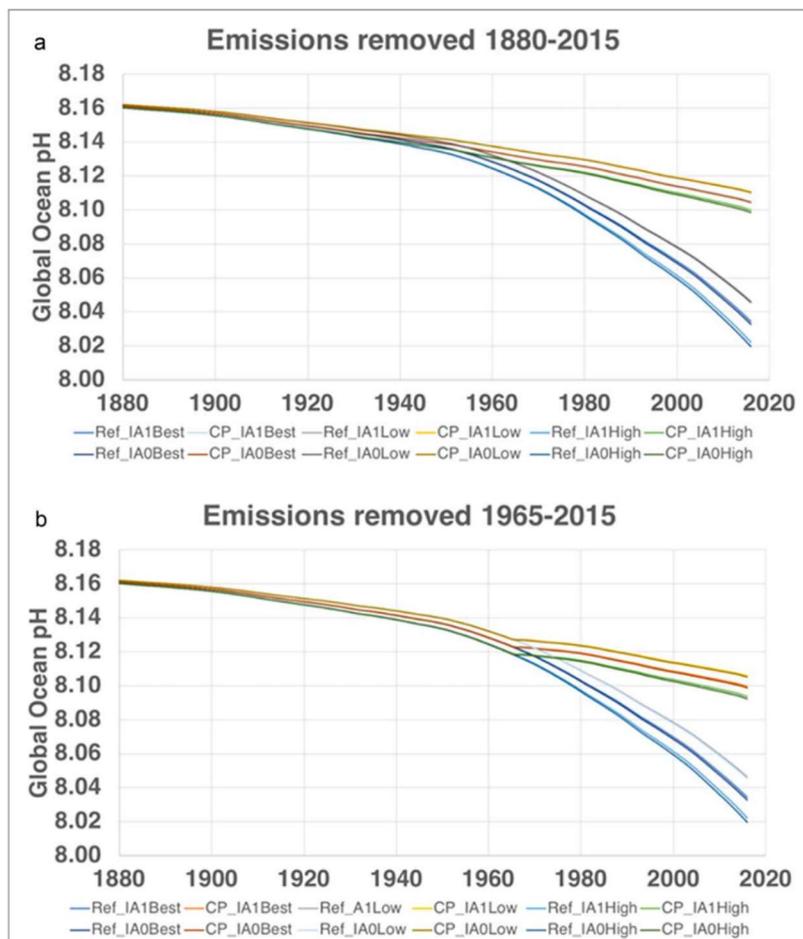


Figura 16 a) Diminuzione stimata del pH storica, considerando le forzanti antropiche e naturali e nell'ipotesi di rimozione delle majors, per il 1880–2015. b) Stesse valutazioni, con rimozione per il 1965–2015. Ref è il riferimento, con le emissioni delle majors incluse. CP è il riferimento, meno le emissioni dei produttori, sottratte per i periodi indicati. IA1 forzanti complete, inclusive di aerosol da combustione. IA0 forzanti complete, meno gli aerosol da combustione. Parametri Best, High, Low come in Tabella 10.

4.4.3 Emissioni ENI ed effetti sul pH

L'effetto sul pH globale attribuito ad ENI viene riassunto nel testo della citazione (pag. 44):

“Il data base dello studio Licker et al. (2019) consente di evidenziare che nel periodo 1980-2015 Eni ha contribuito ad acidificare gli oceani, riducendo il pH per un intervallo compreso tra 0,000365 e 0,000444”.

In Tabella 13 si riportano i valori forniti da Licker et al. (2019) per ENI e la relativa analisi di sensitività/incertezza rispetto a parametri ed ipotesi emissive di fondo (similmente a Ekwurzel et al., 2017).

<i>Table 4. Contribution from emissions (1880-2015; 1965-2015;1980-2015) traced to individual carbon producers to change in global mean surface ocean pH 1880-2015 (pH; %).</i>													
Emissions removed from 1880-2015													
Model forcing		Full historical forcing A1											
Thermal and carbon parameters		Low				Best				High			
Model reference global mean surface ocean pH change 1880-2015 (pH)		-0,113				-0,124				-0,135			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	-4,251	0,166	0,375	0,015	-4,666	0,174	0,376	0,014	-5,104	0,157	0,377	0,012
Full historical forcing minus historical fossil fuel aerosols A0													
		Low				Best				High			
Model reference global mean surface ocean pH change 1880-2015 (pH)		-0,114				-0,126				-0,138			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	-4,280	0,174	0,375	0,015	-4,710	0,184	0,375	0,015	-5,177	0,183	0,376	0,013
Emissions removed from 1980-2015													
Full historical forcing A1													
		Low				Best				High			
Model reference global mean surface ocean pH change 1880-2015 (pH)		-0,113				-0,124				-0,135			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	-3,658	0,129	0,323	0,011	-4,008	0,137	0,323	0,011	-4,385	0,139	<i>0,324</i>	0,010
Full historical forcing minus historical fossil fuel aerosols A0													
		Low				Best				High			
Model reference global mean surface ocean pH change 1880-2015 (pH)		-0,114				-0,126				-0,138			
Carbon producer	Group** 1 = IO; 2=MSO; 3=CPS	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)	pH x10⁴	Error (pH) x10⁴	Percent	Error (%)
<i>ENI, Italy</i>	1	-3,680	0,133	<i>0,322</i>	0,012	-4,047	0,147	0,322	0,012	-4,444	0,155	0,323	0,011

Tabella 13 Contributi di acidificazione (pH) stimati di ENI per i periodi 1880-2015 e 1980-2010 e relative percentuali sul totale. Ekwurzel et al. (2017). Materiale supplementare (file ERL_14_12_124060_suppdata_1). Si osservi l'indicazione relativa di pH globale (Model reference global mean surface ocean pH change 1880-2015 (pH)), nei due casi con/senza inclusione dell'effetto degli aerosols (Full historical forcing/minus historical fossil fuel aerosols). Si osservi il valore delle stime e relativo errore nei vari casi (Error %, Error pH). In **grassetto** nella Tabella i valori riportati nella citazione per il 1980-2015 (-0,000365 a -0,000444, pH). Si osservino gli estremi dei valori percentuali (rispetto al totale di emissioni atmosferico), in corsivo (0.322%-0.324%) per il 1980-2015, sempre ampiamente inferiori all'1% della corrispondente stima totale.

4.4.4 Analisi di incertezza

I *range* di incertezza indicati nelle stime precedenti, si riferiscono alle incertezze date i) dalla calibrazione del modello globale semplificato (FAIR), che include la scelta di vari parametri (come già riportato riguardo al lavoro di Ekwurzel et al., 2017) e ii) dalla mancanza di dati di aerosol da combustione da tracciare agli emettitori.

Secondo gli autori, il contributo all'incremento della CO₂ dato da deforestazione e *land-use* è probabilmente quantificabile in un ~31% delle emissioni totali storiche di CO₂ (1880-2017), con incertezza maggiore rispetto alle emissioni da combustione di fossili. Questo potrebbe riportarsi in un livello di incertezza dell'ordine del 10%-15% nell'attribuzione della variazione del pH.

4.5 Contributo non lineare

Si osserva come risultati qui citati, in base alla struttura non lineare dei modelli utilizzati per la modellazione della risposta dinamica del sistema terra-atmosfera (e quindi della non linearità di tale risposta, come sopra indicato), mostrano chiaramente una non proporzionalità tra (le stime dei) valori emissivi attribuiti su base percentuale e le relative stime modellistiche di impatto. In Tabella 14 si riportano i relativi valori percentuali. Chiaramente, si osserva come il contributo alle (variazioni delle) variabili *target* stimato è sempre inferiore, in alcuni casi del 50% o meno, del valore di riferimento emissivo. Nel periodo P2 (1950-2010) si osserva chiaramente come nemmeno le concentrazioni di CO₂ e stimate sono proporzionali alle emissioni conteggiate, bensì minori per un fattore vicino a -45%. Tale circostanza sembra interessante, poiché ci si aspetterebbe una proporzionalità almeno approssimata tra emissioni e concentrazioni in atmosfera.

P	Rif.	Var.	Var. nome [-]	ENI	Total	%
P1	Heede (2014b)	E_{cum}	Emissioni cumulate [GtCO ₂ e]	5.97	1450	0,41%
P1	Ekwurzel et al. (2017)	ΔCO_2	Anidride carbonica [ppm]	0.404	103	0,39%
P1	Ekwurzel et al. (2017)	$\Delta GMST$	Anomalia termica [°C]	$10^{-3} \cdot 2.7$	0.96	0,28%
P1	Ekwurzel et al. (2017)	ΔGSL	Livello medio marino [mm]	$10^{-2} \cdot 28$	177	0,16%
P1	Licker et al. (2019)	ΔpH	Potenziale idrogeno [.] = $-\log_{10}[H_3O^+]$	$-10^{-4} \cdot (4.66)$	0.12	0,38%
P2	Heede (2014b)	E_{cum}	Emissioni cumulate [GtCO ₂ e]	4.77*	795	0,60%
P2	Ekwurzel et al. (2017)	ΔCO_2	Anidride carbonica [ppm]	0.347	103	0,34%
P2	Ekwurzel et al. (2017)	$\Delta GMST$	Anomalia termica [°C]	$10^{-3} \cdot 2.2$	0.80	0,27%
P2	Ekwurzel et al. (2017)	ΔGSL	Livello medio marino [mm]	$10^{-2} \cdot 15$	16.67	0,90%
P2	Licker et al. (2019)	ΔpH	Potenziale idrogeno [.] = $-\log_{10}[H_3O^+]$	$-10^{-4} \cdot (4.05)$	0.13	0,32%

Tabella 14 Range percentuale delle stime di Heede (2014b), Ekwurzel et al. (2017) e Licker (2019). P1: 1880-2010 (si osservi come in realtà le informazioni relative alle emissioni di ENI siano disponibili dal 1950). P2: 1980-2010 (Licker et al., 1880-2015, 1980-2015). Caso A1, full historical forcings. Per le emissioni cumulate in Heede (2014b). In **grassetto**, il valore di riferimento per le percentuali riferite alle emissioni. In corsivo, valori percentuali delle variazioni inferiori al valore di riferimento emissivo per quel periodo.

Tale indicazione mostra il comportamento non lineare della risposta, dipendente come detto dalla struttura della risposta del sistema rispetto ai vari processi coinvolti e dall'entità e ordine cronologico degli input emissivi, sia quelli target, sia quelli esterni (emissioni da altri emettitori). Tale circostanza mostra inequivocabilmente la non correttezza di assunzioni *a priori* di contributi proporzionali alle emissioni percentuali.

5 Considerazioni su *Impact e Extreme Events Attribution*

5.1 Rilevanza

In tema di *Attribution Science*, acquisisce interesse una breve digressione sui temi della *Extreme Events Attribution* e della *Impact Attribution*.

Come detto, l'analisi dei più recenti documenti forniti dal *panel* IPCC, ossia del rapporto di valutazione, *Assessment Report 6*, AR6, costruito sulla base di una imponente mole di letteratura, mostra come un elevato livello di confidenza/verosimiglianza si possa oramai attribuire alle conclusioni sul tema di *extreme events*, tuttavia tramite la mediazione di meccanismi di attribuzione parziale del rischio (FAR, *fraction of attributable risk*).

Un livello lievemente più basso (ma sempre medio-alto) di confidenza/verosimiglianza si può attribuire al tema 3) *impact attribution*, con notevole incertezza alla scala locale e con una rilevante interazione con i meccanismi di uso e gestione del territorio.

La conduzione di tali esercizi di attribuzione avviene ad oggi tramite approcci di vario tipo, non del tutto "codificati", benché si possano evidenziare alcune tendenze.

5.2 *Extreme Events Attribution e Fraction of Attributable Risk FAR*

Un approccio di recente utilizzato per l'attribuzione relativa al tema degli eventi estremi è il cosiddetto approccio della quota a parte di rischio, *Fraction of Attributable Risk*, FAR (Lott et al., 2016; IPCC 2021a). Tale approccio consiste, nella sostanza, nel calcolo di una quota, o frazione del rischio/pericolo relativo ad un potenziale (tipologia di) evento estremo, calcolato nel modo seguente

$$FAR = 1 - \frac{P_{NAT}}{P_{ALL}} \quad . \quad \text{Equazione 12}$$

Qui P_{ALL} rappresenta la probabilità (rischio) di accadimento di un evento nel mondo "reale", *i.e.* considerando la presenza di tutte le variabili/forzanti esterne, naturali e antropogeniche. P_{NAT} rappresenta la probabilità di occorrenza dello stesso evento, nella condizione in cui le sole variabili naturali fossero presenti (*i.e.* dopo la rimozione delle cause antropiche).

La modalità più ovvia di calcolo di tale fattore FAR è l'utilizzo di modelli climatici atti a simulare eventi di tipo estremo (possibilmente, con una buona affidabilità). Tali modelli vengono utilizzati per condurre simulazioni numeriche, con *input* dati (anche) da forzanti emissive, solo naturali (P_{NAT}) e anche antropiche (P_{ALL}), così da valutare le differenti probabilità di occorrenza nei due casi. Risulta ovvio da tale approccio, che si debba supporre come (solo) una parte del pericolo/rischio connesso ad eventi estremi, sia effettivamente da attribuire alla presenza di cambiamenti climatici. Tale

circostanza trova d'altronde conferma nell'evidente intuizione che la presenza di un pericolo/rischio rispetto all'occorrenza di eventi estremi di ordine naturale, è presente, anche in assenza di alcuna variazione climatica e, quindi, di alcuna azione antropica/emissiva.

Al di là della complessità e del tempo necessario a condurre complesse/lunghe simulazioni atte a fornire valutazioni numeriche (del *range*) dei valori di tale variabile FAR, risulta evidente come tale valore, per definizione minore di 1, ove applicato in termini di valutazione di una eventuale responsabilità quantitativa legata alla presenza e/o genesi emissiva dei cambiamenti climatici, contribuirebbe certamente a diminuire tale valutazione.

5.3 *Impact Attribution*

Il tema dell'attribuzione degli impatti (*Impact Attribution*) è ampiamente trattata nell'ambito dei *report* dell'IPCC (e.g. IPCC, 2021a).

In particolare, nel *report* AR6 si riporta come

“L'attribuzione di variazioni in un sistema umano o naturale...a cambiamenti in sistemi legati al clima...richiede di considerare altri potenziali motivi di variazione, quali cambiamenti tecnologici ed economici in relazione all'agricoltura che impattino la produzione...cambiamenti nelle dinamiche delle popolazione umana e vulnerabilità che impattino i danni indotti da piene, o incendi, o la perdita di habitat che porti al declino di specie animali”.²⁵

Tale affermazione del tutto generale, non configura specifiche metodologie o approcci *standard* o comunque replicabili, atti a differenziare gli effetti dovuti ai cambiamenti climatici, rispetto ad ulteriori condizioni al contorno, quali quelle indicate ad esempio.

Tuttavia, conferma la circostanza che nella valutazione degli impatti di eventi naturali (a guida climatica) si debba ipotizzare, perlomeno una presenza di più concause e che la presenza di cambiamenti climatici possa (ma non debba necessariamente) costituire una parte rilevante di tale impatto.

Anche in questo caso, volendo ipotizzare una quantificazione numerica di un “grado di influenza” dei cambiamenti climatici sugli impatti, sembrerebbe logico come tale valore, minore di 1, ove applicato in termini di valutazione di una eventuale responsabilità quantitativa legata alla presenza e/o genesi emissiva dei cambiamenti climatici, contribuirebbe certamente a diminuire tale valutazione.

²⁵ *“The attribution of a change in a natural or human system ...to changes in climate-related systems ...requires accounting for other potential drivers of change, such as technological and economic changes in agriculture affecting crop production...changes in human population patterns and vulnerability affecting flood- or wildfire-induced damages, or habitat loss driving declines in wild species”* IPCC, 2021. p. 206.

6 Considerazioni conclusive e rapporti con il contenzioso

6.1 Atto di citazione e lavori di letteratura considerati

Ci si riferisce qui a quanto riportato nell'Atto di citazione a sostegno delle tesi degli Attori, in particolare in riferimento a lavori condotti nel campo della *Source Attribution* (pag. 43-44), finalizzati a valutare l'effetto di emissioni passate da varie *majors*, inclusa ENI, sull'andamento di alcune variabili ambientali, considerate come indicatori della presenza di cambiamenti climatici. Tali lavori investigano aspetti/eventi relativi al passato, non occupandosi cioè di evoluzioni future, e.g. in termini di proiezioni di scenario emissivo/climatico.

Si riportano qui alcune considerazioni riassuntive, in ordine ad aspetti, relativi soprattutto al tema della *Source Attribution*, qui analizzato in maggiore dettaglio, che a parere di chi scrive rilevano ai fini della interpretazione delle tesi contenute nell'Atto di citazione. Si riportano alcuni aspetti di tipo istituzionale/negoziale, in particolare connessi all'attività di IPCC ed alla negoziazione climatica.

Si riassumono poi i risultati dell'analisi qui condotta in relazione ai lavori di letteratura citati nell'Atto, che di fatto costituiscono in sostanza l'attuale *corpus* documentale disponibile in relazione al tema della *Source Attribution* verso entità specifiche, pubbliche o private.

Si forniscono poi alcune conclusioni relative all'oggetto del contenzioso.

6.2 Aspetti Istituzionali/negoziali. UNFCCC, IPCC e Proposta Brasiliana

Nell'ambito del più recente lavoro di valutazione dell'IPCC AR6 (WGI-III), come sopra mostrato, il tema della *SA* è di fatto poco considerato, né tantomeno si fornisce una valutazione "formale", secondo il metodo IPCC, del livello di verosimiglianza/*likelihood* di tali studi. Non è quindi disponibile al momento una quantificazione dell'affidabilità di tali metodi.

La Proposta Brasiliana *BP* è stata presentata nel 1997 nell'ambito dei lavori della UNFCCC, con lo scopo di quantificare l'effetto/responsabilità di emissioni prodotte da differenti nazioni sui fenomeni di cambiamento climatico. Tuttavia, per quanto di conoscenza di chi scrive, tale proposta non è mai stata formalmente adottata dalla stessa UNFCCC, né tantomeno applicata per la valutazione formale di effetti/responsabilità emissive di alcuno stato, o altra entità.

Si osservi peraltro che tale proposta riguardava esplicitamente gli effetti emissivi di entità quali Stati e governi, mentre non faceva menzione di specifiche entità/compagnie.

Nel *report* di IPCC-AR6 la *climate litigation* (spesso basata, almeno in forma qualitativa, su concetti e metodi di tipo *Source Attribution*) è oramai di fatto considerata un fenomeno che può impattare (se non indirizzare) l'azione governativa di mitigazione climatica²⁶.

Tuttavia, come detto, IPCC non fornisce, ad oggi, chiare indicazioni su i) affidabilità/verosimiglianza dei risultati ottenuti e ii) metodi di riferimento da utilizzare.

²⁶ "Climate litigation is growing and can affect the outcome and ambition of climate governance (medium evidence, high agreement)." WGIII, p. 125.

Tali valutazioni, quindi, sono ad oggi tipicamente condotte da differenti attori (i.e. ricercatori in ambito climatico), tramite metodi e modelli differenti da caso a caso, in assenza di un approccio standard, o di un metodo univocamente accettato dalla comunità scientifica, anche in relazione alla valutazione del (notevole, come qui documentato) grado di incertezza dei risultati.

6.3 Aspetti tecnico-scientifici

6.3.1 Heede (2014b)

Gran parte delle conclusioni riportate nei lavori scientifici citati nell'Atto (che nei fatti costituiscono una parte sostanziale della letteratura disponibile sul tema specifico della SA verso entità di tipo *companies/majors/oil & gas*) dipendono dalle stime di Heede (2014b).

Il lavoro di Heede (anche co-autore di molti lavori citati relativi a SA (*majors*), che, come detto rappresenta di fatto un mero esercizio di inventario emissivo, ipotizza, più o meno esplicitamente, la modifica dell'approccio (di fatto, concettuale, più che pratico) di UNFCCC, di voler cioè valutare i contributi emissivi e le rispettive responsabilità sui cambiamenti climatici a livello di Stati, per passare ad una valutazione basata su singole compagnie.

Al di là delle possibili implicazioni legali e normative che tale sistema potrebbe comportare (che vanno ben aldilà del contenuto del presente lavoro), non risulta a chi scrive che tale approccio sia stato discusso, né tantomeno proposto/ratificato in sede UN, UNFCCC, IPCC.

Si noti peraltro che Heede (2014b) ragiona di emissioni complessive, ma non fornisce stime di variazioni delle concentrazioni atmosferiche di CO₂ relative, né tantomeno si occupa di ipotizzare livelli di responsabilità proporzionali a tali emissioni, o in altro modo valutati.

Le stime di Heede, secondo l'autore stesso, comportano un errore globale del 10-15% almeno (e verosimilmente di più per singoli emettitori).

Si noti che la ricostruzione delle emissioni di ENI (e 90 altre *majors* !!!) richiede un lavoro meticoloso e lungo. Riguardo ad ENI, ad una prima impressione, le stime sembrano basate su una raccolta di dati verosimilmente accurata (e in pratica interamente basata su documenti *deliverable* di ENI su produzione, 1950-2014), ma che richiederebbe una opportuna verifica.

Come sopra ricordato tuttavia, una stima, anche corretta dell'ammontare delle emissioni non comporta di per sé, l'evidenza, né tantomeno la quantificazione, di un reale nesso causale.

Inoltre, non è dato sapere al momento, né forse sarebbe possibile, avere una corretta valutazione degli errori nelle stime dei valori emissivi di tutte le altre entità (*majors*, ma anche emettitori ad altro titolo, comunque da includere). Tale circostanza è fondamentale, poiché, come ampiamente commentato, i metodi di attribuzione utilizzati (i.e. in seguito il metodo *leave one out* di Ekwurzel, 2017), oltre ad imprecisioni intrinseche ed all'inevitabile errore modellistico, dipendono in maniera rilevante dall'interazione delle emissioni *target* (qui, ENI), con i percorsi e quantità di emissioni delle altre entità (*majors*) coinvolte, specificamente in ragione delle non-linearità modellistiche ampiamente commentate e documentate sopra, che possono amplificare/ridurre gli effetti delle emissioni *target*.

E' altresì da notare come le stime di Heede (2014b) includano la componente SCOPE3 (come menzionato anche in citazione, pag. 43). Tale componente si osservi bene, rappresenta una sorgente di emissioni, non legata direttamente all'attività delle *companies* (qui, ENI), ma alle emissioni da combustione dei consumatori a qualunque titolo, ossia chiunque compri ed utilizzi combustili ENI.

Tale componente copre circa il 90% delle emissioni stimate. Sembra ovvio ipotizzare che, non includendo tali emissioni tra quelle attribuite direttamente ad ENI, le emissioni da inventario sarebbero 9-10 volte minori e similmente diminuirebbero gli impatti stimati di tali emissioni.

6.3.2 Ekwurzel et al. (2017)

I risultati di Ekwurzel et al. (2017) soffrono di incertezze date da:

- 1) Incerta valutazione della sensitività climatica del sistema terra-atmosfera;
- 2) Mancanza di dati su *aerosol* da combustione, tracciabili ai diversi emettitori;
- 3) Ordine di rimozione delle emissioni.

Gli autori illustrano, in maniera non del tutto comprensibile, l'effetto (complessivo?) di tali incertezze, commentato in precedenza e quantificabile (2010, CO₂: 375-405 ppm. ΔGMST: tra +0.75 °C e +1.3 °C, ΔGSL: tra -7 cm e +10 cm). Si osservi in tal senso l'apparente incongruenza data da possibili valori negativi del valore di ΔGSL. Secondo tale stima, in alcuni scenari parametrici/emissivi, le emissioni di gas serra farebbero diminuire il livello medio marino.

Tuttavia, Ekwurzel et al. (2017) non considerano le ulteriori incertezze insite nella variazione dei parametri modellistici, che risultano in una importante amplificazione della risposta (si veda la variabilità della risposta emissiva in CO₂ e termica in GMST riportata in Millar et al., 2016).

Tali indicazioni mostrano come, di fatto, i risultati dell'esercizio di attribuzione di Ekwurzel et al. (2017) soffrano di una rilevante incertezza "primaria", intrinseca ai modelli, nonché di una incertezza "secondaria" (ma non da considerare minore a priori), data da i) l'incertezza nel dato di ingresso e ii) la scelta del metodo di *SA* (qui il metodo NR, o *leave one out*), che, come sopra mostrato, è fra i meno consigliati.

Sarebbe quantomeno necessario qui:

- 1) Esplorare la sensitività al *range* di parametri del modello FAIR (e per le altre variabili dei modelli relativi, GSL, pH);
- 2) Esplorare la sensitività al *range* di valutazione delle emissioni (±15% o più);
- 3) Esplorare la sensitività all'utilizzo dei diversi metodi di *SA*, non solo il metodo NR.

Tale esercizio darebbe almeno una idea del (reale) campo di incertezza modellistico.

6.3.3 Variabili fisiche di interesse nell'Atto e nella SA e scale spazio-temporali

I riferimenti dell'Atto di citazione, in particolare riguardo al *petitum*, o richiesta di accertamento della responsabilità di Eni per i danni lamentati, si riferiscono a eventi e variabili di tipologie differenti (Atto, pag. 123-124).

Gli eventi *target* sono così classificabili:

- 1) Eventi di tipo *slow-onset* (e.g. risalita del livello marino, cuneo salino, fusione glaciale, salute/qualità dell'aria) localizzati spazialmente in siti specifici, riferiti al passato.

- 2) Eventi di tipo estremo, *extreme events* (e.g. alluvioni, frane, uragani, siccità, ondate di calore), locali nello spazio e nel tempo, ossia riferiti a specifiche aree/scale spaziali (siti specifici) e temporali (eventi localizzati nel tempo), riferiti al passato.
- 3) Eventi dei due tipi, riferiti al futuro.

Va osservato, per ognuna di tali tipologie, come:

- 1) Eventi *slow-onset* localizzati passati. I modelli tipicamente (per ora di fatto esclusivamente) utilizzati per la valutazione della *SA* a livello di entità/*company*, di tipo IRMs, quali FAIR usato da Ekwurzel et al. (2017) per GMST e GSL (tramite modello Kopp et al., 2016) e come base di partenza da Licker et al. (2019) per pH marino, semplificano in maniera puntuale/concentrata (un solo valore medio per il globo terrestre) sia emissioni, sia risposta atmosferica/marina. Tale circostanza comporta che:

i) le fonti emissive siano “mischiate” o “cumulate” fin da subito in un unico valore, perdendo subito la connotazione distribuita, che sarebbe, almeno concettualmente, alla base della discriminazione del loro impatto su base spaziale (poiché teoricamente emissioni derivanti da specifici emettitori sarebbero anche connotati da una caratterizzazione geografica).

ii) il risultato delle elaborazioni, in termini di ognuno delle variabili così risultanti è in forma globale, non distribuita.

Dunque, anche ove fosse possibile valutare in modo accurato/affidabile l'effetto di concentrazioni (distribuite o aggregate) passate, su una variabile rappresentativa di processi *slow-onset* in senso globale, questo poco o nulla direbbe sulla scala locale, che quindi andrebbe studiata specificamente in termini di *SA* (a livello di *majors*) per periodi prolungati, tentativo finora mai condotto a conoscenza di chi scrive. Tale simulazione richiederebbe l'utilizzo di modelli di tipo ESMs (GCMs), normalmente utilizzati da IPCC per la costruzione di scenari di riferimento (RCPs, SSPs, etc..) e richiedono un tempo computazione verosimilmente di almeno due ordini di grandezza superiori ai modelli di tipo IRMs.

Pare quindi che per tale finalità, nessuna delle variabili stimate finora (GMST, GSL, pH) sia largamente affidabile ad oggi.

- 2) Eventi estremi locali (spazio e tempo) localizzati passati. I metodi e modelli finora applicati/suggeriti per la *SA*, che si occupano di variabili medie su scale spaziali ampie (*i.e.* per lo più annuali) nulla dicono sugli eventi estremi, che sono localizzati nel tempo (scale orarie/giornaliere) e nello spazio (regioni, o siti specifici).

Dunque, non sembra ad oggi possibile valutare in modo accurato/affidabile l'effetto di concentrazioni (distribuite o aggregate) passate, su una variabile rappresentativa di processi del tipo *extreme events* in senso né globale (scala che non si concilia con scale spaziali e temporali di questi eventi), né tantomeno locale (poiché i metodi *SA* finora testati lavorano come detto solo su scala globale).

- 3) Eventi dei due tipi, riferiti al futuro. Alle precedenti complessità, si unisce l'evidente necessità di produrre degli scenari emissivi futuri verosimili/certi (per ogni entità/*major*) da utilizzare per l'esercizio di attribuzione in senso *SA*. Tali scenari possono essere variegati e complessi e richiedono valutazioni opportune. Ovviamente in tal senso è necessaria un'analisi di sensitività aggiuntiva per esplorare le potenziali incertezze (verosimilmente rilevanti).

Rimane poi il tema (ineludibile) per cui non sembra verosimile l'ipotesi di quantificare in maniera esatta un danno presunto futuro.

Le variabili *target* considerate nell'Atto di citazione, benché non esplicitamente menzionate, si riferiscono a domini fisici differenti, in particolare:

- 1) *Meteo-climatiche*. Queste includono temperature (elevate-estreme, *i.e.* ondate di calore), precipitazioni (intensità estreme, *i.e.* alluvioni pluviali, periodi secchi, *i.e.* siccità climatica), velocità del vento (uragani, etc.), incendi (connessi a siccità/alte temperature).
- 2) *Idrologiche*. Portate fluviali elevate/estreme (alluvioni fluviali), basse (magre/siccità idrologiche).
- 3) *Atmosferiche*. Qualità aria, particolato, polveri, etc. (problemi respiratori, allergici, cutanei.)
- 4) *Marine*. Livello marino medio/estremo, cuneo salino, acidità.

Si osservi, riguardo alle variabili qui citate, che l'attuale disponibilità di informazioni relative al contributo in termini di *SA*, indipendentemente dal livello di affidabilità connesso riguarda variabili:

- 1) *Meteo-climatiche*. Temperatura media globale GMST. Tale valore ha certamente un legame più o meno forte con temperature estreme, ma nessuno studio disponibile ad oggi a conoscenza di chi scrive mostra un legame diretto tra emissioni da enti specifici e (contributo alle) ad ondate di calore o eventi termici estremi.
- 2) *Idrologiche*. I fenomeni idrologici estremi dipendono da condizioni climatiche tipicamente locali, o regionali (soprattutto magre/siccità idrologiche), ma ancora nessun studio disponibile ad oggi a conoscenza di chi scrive mostra un legame diretto tra emissioni da enti specifici e (contributo a) eventi idrologici estremi.
- 3) *Atmosferiche*. CO₂ e CO_{2e}. La CO₂ ed il CH₄, cioè i composti sostanzialmente considerati nell'analisi di *SA*, benché noti per l'effetto climalterante, non sono di fatto composti "inquinanti" e solo in senso generale hanno a che fare con la presenza di particolati e altri composti. Nessun studio condotto ad ora mostra un legame diretto tra emissioni specifiche e (contributo agli) inquinanti qui indicati.
- 4) *Marine*. Livello marino medio, acidità. Il livello medio marino è verosimilmente connesso all'andamento dei valori estremi, ma tale connessione è da valutare, peraltro in senso puntuale. Nessun studio condotto ad ora mostra un legame diretto tra emissioni specifiche e (contributo al) livello marino medio locale, o estremo.

In base a tutte queste considerazioni, sembra di poter affermare che, nella letteratura disponibile ad oggi, non vi siano contributi che supportano, in senso specifico, le richieste contenute nell'Atto.

6.4 Incertezza nelle stime delle variabili e osservazioni disponibili

In Tabella 15 si riassumono i valori relativi ai *range* di incertezza delle stime di Heede (2014b), Ekwurzel et al. (2017) e Licker (2019). Per Ekwurzel et al. (2017), si considera il solo caso A1, *full historical forcings*, poiché il caso A0 come detto rappresenta la simulazione condotta escludendo gli *aerosol*, che però, come noto, non sono attribuiti, configurando questo scenario di fatto come una verifica di incertezza.

Come si vede, solo considerando le fonti di incertezza proposte dagli autori, si osservano margini di incertezza nella valutazione dei contributi di ENI, in particolare intorno al 10% sulle concentrazioni di CO₂e, fino al 40-50% sulle temperature e fino al 70% su livello marino. Si osservi peraltro che l'analisi di incertezza in Ekwurzel et al. (2014), non include l'errore sulla stima delle emissioni totali ($\pm 15\%$), verosimilmente foriera di ulteriore incertezza, in particolare in relazione a valori di emissioni cumulate proporzionalmente piccoli quali quelli di ENI qui riportati.

Andando poi a considerare la sensitività ai valori dei parametri modellistici di FAIR, di sopra illustrata, è verosimile attendersi variazioni ancora più ampie.

Va inoltre segnalato che i valori stimati di variazione delle variabili *target* forniti da Ekwurzel et al. (2017), tutti proporzionalmente molto piccoli, potrebbero raggiungere ordini di grandezza, non significativi/misurabili nell'ambito dell'incertezza di stima.

P	Rif.	Var.	Var. nome [-]	Range/Incert.	Best	Inc.+-%
P1	Heede (2014b)	E_{cum}	Emissioni cumulate [GtCO ₂ e]	5.07-6.86	5.97*	15%
P1	Ekwurzel et al. (2017)	ΔCO_2	Anidride carbonica [ppm]	0.360-0.452	0.404	11%
P1	Ekwurzel et al. (2017)	$\Delta GMST$	Anomalia termica [°C]	$10^{-3} \cdot (2.0-4.5)$	$10^{-3} \cdot 2.7$	46%
P1	Ekwurzel et al. (2017)	ΔGSL	Livello medio marino [mm]	$10^{-2} \cdot (7-50)$	$10^{-2} \cdot 28$	77%
P1	Licker et al. (2019)	ΔpH	Potenziale idrogeno [.] = $-\log_{10}[H_3O^+]$	$-10^{-4} \cdot (4.25-5.10)$	$-10^{-4} \cdot (4.66)$	9%
P2	Heede (2014b)	E_{cum}	Emissioni cumulate [GtCO ₂ e]	4.05-5.49	4.77*	15%
P2	Ekwurzel et al. (2017)	ΔCO_2	Anidride carbonica [ppm]	0.309-0.388	0.336	12%
P2	Ekwurzel et al. (2017)	$\Delta GMST$	Anomalia termica [°C]	$10^{-3} \cdot (1.3-3.7)$	$10^{-3} \cdot 2.2$	55%
P2	Ekwurzel et al. (2017)	ΔGSL	Livello medio marino [mm]	$10^{-2} \cdot (4-26)$	$10^{-2} \cdot 15$	73%
P2	Licker et al. (2019)	ΔpH	Potenziale idrogeno [.] = $-\log_{10}[H_3O^+]$	$-10^{-4} \cdot (3.65-4.44)$	$-10^{-4} \cdot (4.05)$	10%

Tabella 15. Contributi ENI. Range di incertezza delle stime di Heede (2014b), Ekwurzel et al. (2017) e Licker (2019). P1: 1880-2010 (si osservi come in realtà le informazioni relative alle emissioni di ENI siano disponibili dal 1950). P2: 1980-2010 (Licker et al., 1880-2015, 1980-2015). Caso A1, full historical forcings. * Per le emissioni cumulate in Heede (2014b) E_{cum} , si applica un'incertezza del 15%, come ipotizzato dall'autore (valori Range/Incert. calcolati a posteriori, in corsivo). Emissioni cumulate (1980-2010) calcolate tramite foglio del materiale supplementare di Ekwurzel et al. (2017), 10584_2017_1978_MOESM3_ESM.xlsx.

In particolare, poiché tali valori rappresentano in sostanza “astrazioni modellistiche”, sembra lecito chiedersi se tali valori potrebbero mai trovare un riscontro significativo in termini di misura.

In sostanza, prendendo ad esempio le temperature, ove ipoteticamente si potesse accettare che le emissioni di ENI (o altre *majors*) abbiano contribuito con un cambiamento delle temperature $\Delta GMST$ dell'ordine di qualche millesimo di °C (qui, $10^{-3} \cdot 2.2$ °C), sorge spontaneo chiedersi se tale ipotetico incremento di temperatura sarebbe mai rilevabile e quindi, di fatto, significativo, in una valutazione dello stato termico dell'atmosfera.

Ove tale valutazione non fosse significativa, cioè, in ipotetico “test di ipotesi”, la variazione non fosse percepibile/significativa, si potrebbe concludere che tale incremento (teorico) non sarebbe di fatto nemmeno misurabile, né verosimilmente, percepito.

Tale test ipotetico non si può condurre, poiché ovviamente non è possibile ricreare la situazione teorica in cui “misurare” la temperatura del sistema terra nelle due condizioni (puramente modellistiche e teoriche) corrispondenti alla presenza/assenza di emissioni *target*. Tuttavia, risulta possibile ragionare sulla capacità di determinare, con una data precisione, l’effettivo valore della variabile *target*, ossia l’incremento della temperatura globale osservato $\Delta\text{GMST}_{\text{obs}}$. Secondo il *report* IPCC AR6 (SPM, pag. 5), l’incremento termico medio terrestre stimato dai dati disponibili (dal 1850-1900 al 2010-2019) è pari a $\Delta\text{GMST}_{\text{obs}} = 1.07 \pm 0.27 \text{ }^\circ\text{C}$ ²⁷. In effetti, tale valore sembra indicare, che, a tutt’oggi, la stima dell’incremento termico dato dai cambiamenti climatici, si possa valutare con una incertezza (come caratterizzata dalla deviazione standard) pari a $\pm 0.27 \text{ }^\circ\text{C}$.

Sembra sensato ipotizzare qui che tale valore rappresenti una stima della grandezza minima che una variazione della temperatura globale dovrebbe possedere, per essere considerata significativa. O ancora, è possibile ipotizzare che qualunque valore ipotizzato di (variazione di) temperatura, se ricadente nell’intervallo $1.07 \pm 0.27 \text{ }^\circ\text{C}$, non sia significativamente diverso da quello osservato.

Ipotizzando di sottrarre/aggiungere il valore stimato del contributo termico ENI al valore medio odierno si avrebbe $\Delta\text{GMST}_{\text{Eni}} = 1.07 \pm \delta\Delta\text{GMST}_{\text{Eni}} = 1.07 \pm 0.002 \text{ }^\circ\text{C}$, largamente contenuto nell’intervallo sopra definito.

In sostanza, si può ipotizzare che l’incremento termico attribuito ad ENI, $\delta\Delta\text{GMST}_{\text{Eni}}$ abbia un significato modellistico chiaro, ma un valore nei fatti irrilevante rispetto alla effettiva capacità di valutare su scala globale variazioni termiche. In sintesi, ove mai tale incremento avvenisse, sarebbe del tutto improbabile (forse impossibile) valutarne l’esistenza in modo significativo. Altresì è da valutare se tale differenza sarebbe mai percepita in maniera sensibile.

Tale ragionamento si può estendere ad altre variabili. In Tabella 16 si riportano i valori di incertezza di stima dei valori medi globali delle variabili ($\mu \pm \sigma$), paragonati con il corrispondente valore ottenuto sottraendo le variazioni stimate sulla base delle emissioni ENI (Caso A1, *full historical forcings*). In corsivo valori ipotetici ottenuti sottraendo le variazioni stimate lato ENI. Come si osserva, tutti i valori ipotetici stimati ricadono nella banda di confidenza dell’incertezza stimata, con differenze dal valore medio che mostrano 1 o 2 ordini di grandezza in meno dell’incertezza di misura, se non per il valore di CO₂, che mostra una differenza dello stesso ordine di grandezza della deviazione standard della stima, benché minore in valore assoluto ($\sigma = 0.5 \text{ ppm}$, $\Delta\text{CO}_{2,\text{Eni}} = 0.404 \text{ ppm}$).

A parte forse per il valore stimato di crescita della CO_{2e} (che, si ricordi, non rappresenta di per sé un inquinante o composto dannoso) si osserva come per tutte le variazioni stimate, tali variazioni non sarebbe verosimilmente percepibili/significative sulla base delle capacità di stima correnti.

²⁷ “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.”

P	Rif.	Var.	Var. nome [-]	Obs. $\pm \sigma$	- ENI
P2	Heede (2014b)	E_{cum}	Emissioni cumulate [GtCO ₂ e]	1450 \pm 145	1444
P2	Ekwurzel et al. (2017)	ΔCO_2	Anidride carbonica [ppm]	417 \pm 0.5 ²⁸	416.6
P2	Ekwurzel et al. (2017)	$\Delta GMST$	Anomalia termica [°C]	1.07 \pm 0.27	1.067
P2	Ekwurzel et al. (2017)	ΔGSL	Livello medio marino [mm]	138 \pm 15	137.72
P2	Licker et al. (2019)	ΔpH	Potenziale idrogeno [.] = $-\log_{10}[H_3O^+]$	-0.06 \pm 0.0025 ²⁹	-0,059

Tabella 16 Contributi ENI. 1850-2010 (pH, 1985-2021). Heede (2014b), Ekwurzel et al. (2017) e Licker (2019). Accuratezza (deviazione standard) nella stima di variabili target aggregate a scala globale e valori ottenuti sottraendo le variazioni stimate lato ENI. Caso A1, full historical forcings. In corsivo valori ipotetici ottenuti sottraendo le variazioni stimate lato ENI che ricadono nella banda di confidenza dell'incertezza stimata ($\mu \pm \sigma$).

6.5 Non proporzionalità dei fattori emissivi

La constatazione della dipendenza non proporzionale e della dinamica temporalmente distribuita degli effetti delle emissioni, qui ampiamente discusse, portano a ipotizzare che:

- 1) Non vi sia una connessione diretta e proporzionale tra entità delle emissioni ed effetti.
- 2) Sia verosimilmente discutibile il criterio secondo cui lo studio delle responsabilità climatiche debba essere condotto in base ad un potenziale ordine di priorità basato sulle quantità di emissioni (equivalenti), ma altri criteri possono essere dirimenti, quali ad esempio il periodo storico e/o la sequenza/tipologia delle emissioni stesse nel tempo.

²⁸ <https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/long-range/forecasts/co2-forecast-for-2023#:~:text=As%20a%20result%2C%20we%20forecast,concentration%20to%20be%20419.2%20ppm.>

²⁹ <https://marine.copernicus.eu/access-data/ocean-monitoring-indicators/global-ocean-acidification-mean-sea-water-ph-time-series>

7 Glossario

7.1 Lista degli acronimi principali

Acronimo	Nome completo	Commento
ACCC	<i>Assessment of Contributions to Climate Change</i>	Esperimento atto alla valutazione dei contributi al cambiamento climatico. Si veda UNFCCC (2002).
AR 4-6	<i>Assessment Report</i>	Relazione di valutazione relativa allo stato del clima edita da IPCC
BP	<i>Brasilian Proposal</i>	Proposta Brasiliana, relativa alla valutazione di effetti sui cambiamenti climatici di emissioni di singoli paesi.
CA	<i>Climate Attribution</i>	Branca delle scienze del clima, atta a valutare se eventi climatici a vario titolo rientrano nella normalità, o sono da attribuire alla presenza di un cambiamento climatico.
CAI	<i>Climate Accountabiliy Institute</i>	Istituto di ricerca no-profit americano. Ha finanziato lo studio di Heede (2014a).
CCA	<i>Climate Change Attribution</i>	Lo studio di come la concentrazione crescente di gas serra in atmosfera impatta vari aspetti del sistema climatico, come le temperature medie globali, il livello dei mari e il ghiaccio marino.
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>	Progetto relativo alla valutazione comparata degli <i>output</i> di più modelli climatici.
D&A	<i>Detection & Attribution</i>	Branca delle scienze del clima, atta a valutare la presenza di un cambiamento climatico significativo e delle eventuali cause.
ECS	<i>Equilibrium Climate Sensitivity</i>	Sensività climatica all'equilibrio. Definita come l'incremento medio all'equilibrio della temperatura globale, in risposta al raddoppio della concentrazione di CO ₂ rispetto al livello pre-industriale.
EMICS	<i>Earth system Models of Intermediate Complexity</i>	Modello climatico con livello di complessità intermedio.
ESMs	<i>Earth System Models</i>	Modelli matematici che descrivono le dinamiche del il sistema terrestre/climatico.
FAIR	<i>Finite Amplitude Impulse Response model</i> , sviluppato da IPCC (AR5) e modificato da Millar et al. (2017)	Modello matematico utilizzato in alcuni studi di SA.
EEA	<i>Extreme Event Attribution</i>	Attribuzione degli Eventi Estremi. Lo studio di come variazioni del clima in senso globale impattano la probabilità di occorrenza e le caratteristiche degli eventi estremi.
FAR	<i>Fraction of Attributable Risk</i>	Frazione o parte del rischio, attribuibile alla presenza di un cambiamento climatico.
GCMs	<i>General Circulation Models</i>	Modelli matematici che simulano le dinamiche della circolazione atmosferica globale/generale
GMST	<i>Global Mean Surface Temperature</i>	Temperatura media globale della superficie terrestre, utilizzato come indicatore di variazioni climatiche/termiche globali.
GSL	<i>Global Sea Level</i>	Livello medio marino globale, utilizzato come indicatore di variazioni climatiche globali.
PPM (ppm)	<i>Parts Per Million</i>	Parti per milione, unità di misura della concentrazione dei gas serra.
GWP	<i>Global Warming Potential</i>	Potenziale di riscaldamento globale, definito come il potenziale contributo all'effetto serra delle molecole di una particolare specie gassosa presente in atmosfera.

IA	<i>Impact Attribution</i>	Attribuzione degli impatti. Lo studio di come le variazioni del clima impattano sugli esseri umani e sugli ecosistemi.
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	Comitato intergovernativo sui cambiamenti climatici. Istituito nel 1988 dalla World Meteorological Organization (WMO) e dall'United Nations Environment Program (UNEP), è il principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici.
IRMs	<i>Impulse Response Models</i>	Modelli di tipo Risposta all'Impulso. Concentrano l'intera complessità e la risposta del sistema terra/atmosfera all'immissione di gas serra in un sistema puntuale, tempo variante, spesso semplificato tramite una risposta del tipo "serbatoio lineare/non lineare".
LULUCF	<i>Land Use, Land Use Change and Forestry</i>	Uso del suolo e cambiamenti di uso del suolo e di copertura forestale. Considerati come con-cause delle variazioni climatiche.
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>	Percorsi ipotetici di variazione delle emissioni e della relativa risposta radiativa, utilizzati nell'ambito dell'AR5 per valutare possibili strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici.
RSL	<i>Regional/Relative Sea Level</i>	Livello marino regionale/relativo. Indicatore di effetti locali del cambiamento climatico.
SA	<i>Source Attribution</i>	Branca della <i>Climate Attribution</i> che si occupa dell'identificazione del contributo relativo di differenti settori, attività ed entità ai cambiamenti climatici.
SCMs	<i>Simplified Climate Models</i>	Modelli climatici di livello estremamente semplificato, spesso utilizzati per simulazioni di scenari ipotetici di risposta climatica a determinati livelli di emissioni.
SOE	<i>Sources of Emission</i>	Sorgenti di emissioni.
SSPs	<i>Shared Socioeconomic Pathways (SSP)</i>	Percorsi Socioeconomici Condivisi. Percorsi ipotetici di variazione delle emissioni e della relativa risposta radiativa, utilizzati nell'ambito dell'AR6 da IPCC, ottenuti intersecando i) differenti Percorsi Socioeconomici Condivisi a livello internazionale con ii) scenari RCP, per valutare possibili strategie di mitigazione dei cambiamenti climatici.
TCR	<i>Transient Climate Response</i>	Risposta climatica temporanea. Definita come l'incremento medio all'equilibrio della temperatura globale, in risposta al raddoppio della concentrazione di CO ₂ rispetto al livello pre-industriale, secondo un incremento annuo di +1%/anno-
TCRE	<i>Transient Climate Response to cumulative Emissions.</i>	Risposta temporanea a emissioni cumulative. Variazione globale media di temperatura per unità di CO ₂ emessa in atmosfera.
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>	Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici, prodotta nella Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite, o Summit della Terra, tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992. Ogni anno, le nazioni che hanno firmato il trattato si incontrano nelle COP.
VOCs	<i>Volatile Organic Compound (composti organici volatili)</i>	Composti organici volatili (<i>black carbon</i> , PM _{2.5/5/10} , etc.).
WG I, II, III	<i>Working Group I, II e III.</i>	Gruppi di lavoro di IPCC che preparano i volumi costitutivi degli <i>Assessment Report (AR)</i> .

7.2 Lista dei simboli e variabili principali

Simbolo	Variabile	Commento
α	Riduzione dell'efficienza nell'assimilazione del carbonio nei serbatoi, dipendente dallo stato (<i>i.e.</i> dal carbonio assimilato nei serbatoi stessi)	Modifica al modello AR5-IR, introdotta nel modello FAIR.
α_i	Frazione [...] di emissioni di carbonio per ogni serbatoio ambientale i .	Utilizzata ad esempio come parametro nel modello AR5-IR, FAIR.
τ_i	Costante di tempo [anni] per ogni serbatoio ambientale i .	Utilizzata ad esempio come parametro nel modello AR5-IR, FAIR.
C_{acc}, C, C_0	Concentrazione (accumulata, variazione, valore iniziale/pre-industriale, [ppm]) di CO ₂ in atmosfera.	Utilizzata ad esempio come variabile nel modello AR5-IR, FAIR.
d_1, d_2	Scale temporali delle risposte oceaniche, profondo (1) superficiale (2) [anni].	Utilizzata ad esempio nel modello AR5-IR, FAIR.
CO ₂	Diossido di Carbonio, Anidride Carbonica	Usato anche per indicare concentrazione in atmosfera [ppm].
CO _{2e}	CO ₂ equivalente	Usato come misura della concentrazione dei gas climalteranti, espressi in termini di CO ₂ equivalente (cioè con equivalente potenziale di riscaldamento globale GWP).
CH ₄	Metano	Uno dei principali gas climalteranti.
E, E_{cum}	Emissioni climalteranti annue [ppm/anno] e cumulate [GtC, GtCO ₂ , GtCO _{2e}].	1 ppm = 2.12 GtC.
ECS	<i>Equilibrium Climate Sensitivity</i> [°C v K], sensitività climatica all'equilibrio.	Utilizzata ad esempio come variabile nel modello AR5-IR, FAIR.
$F, (F_2, F_{ext})$	F , forzante radiativa [W/m ²], F_2 forzante radiativa per raddoppio della concentrazione di CO ₂ , F_{ext} forzante non CO ₂ .	Utilizzata ad esempio come variabile nel modello AR5-IR, FAIR.
FAR	Frazione di rischio attribuibile [...].	Utilizzata nell'ambito della <i>extreme event attribution</i> .
GtC	Giga (10 ⁹) tonnellate di carbonio [GtC]	-
iIRF_100	Funzione di risposta all'impulso su 100 anni [anni]	Utilizzata ad esempio nel modello FAIR.
MtC	Mega (10 ⁶) tonnellate di carbonio [MtC]	-
P_{ALL}, P_{NAT}	P_{ALL} probabilità (rischio) di accadimento di un evento nel mondo "reale", P_{NAT} probabilità di occorrenza "naturale" dello stesso evento (<i>i.e.</i> dopo la rimozione delle cause antropiche).	Utilizzate p.es. nell'ambito della <i>extreme event attribution</i> .
q_1, q_2	Equilibrio termico delle risposte oceaniche, profondo (1) superficiale (2) [°Cm ² W ⁻¹ v Km ² W ⁻¹].	Utilizzata ad esempio nel modello AR5-IR, FAIR.
R_i	Anomalia di concentrazione di CO ₂ [ppm] in atmosfera in un serbatoio ambientale i -esimo	Utilizzata ad esempio come variabile di stato nel modello AR5-IR, FAIR.
ΔGMST	Variazione della temperatura media globale della superficie terrestre [°C v K]	Indicatore di variazioni termiche globali. E.g. modello AR5-IR, FAIR
ΔGSL	Variazione del livello medio marino globale [mm]	Indicatore di variazioni climatiche globali. E.g. modello GSL
N ₂ O	Protossido di azoto.	Uno dei principali gas climalteranti.
r_o, r_c, r_T	Parametri per il calcolo di iIRF_100 ([anni], [anni GtC ⁻¹], [anni°C ⁻¹ v anniK ⁻¹]).	Modello FAIR.
TCR	<i>Transient Climate Response</i> [°C _{1%CO₂} v K _{1%CO₂}], risposta climatica temporanea.	Utilizzata ad esempio come parametro nel modello FAIR.
TCRE	<i>Transient Climate Response to cumulative Emissions</i> [°Cm ² W ⁻¹ v Km ² W ⁻¹], risposta temporanea a emissioni cumulative.	Utilizzata ad esempio come parametro nel modello FAIR.

8 Bibliografia

- 1) Arias, P.A., and various authors, 2021, Technical Summary. 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*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144. doi:[10.1017/9781009157896.002](https://doi.org/10.1017/9781009157896.002).
- 2) Arora, V. K., Boer, G. J., Friedlingstein, P., Eby, M., Jones, C. D., Christian, J. R., Bonan, G., Bopp, L., Brovkin, V., Cadule, P., Hajima, T., Ilyina, T., Lindsay, K., Tjiputra, J. F., and Wu, T. (2013), *Carbon–concentration and carbon–climate feedbacks in CMIP5 Earth system models*, *J. Climate*, 26, 5289–5314.
- 3) Den Elzen, M., Schaeffer, M., 2002, *Responsibility for past and future global warming: uncertainties in attributing anthropogenic climate change*, *Climatic Change* 54: 29–73.
- 4) Ekwurzel, B., Boneham, J., Dalton, M. W., Heede, R., Mera, R. J., Allen, M. R., & Frumhoff, P. C., 2017, *The rise in global atmospheric CO₂, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers*, *Climatic Change* 144(4): 579-590.
- 5) Grasso, M., & Heede, R., 2023, *Time to pay the piper: Fossil fuel companies' reparations for climate damages*, *One Earth* 6(5): 459-463.
- 6) Heede R, 2014a, *Carbon majors: accounting for carbon emissions 1854–2010. Methods & Results Report, 98 pp., Annex B: Methodology*, Climate Mitigation Services, Snowmass, CO.
- 7) Heede, R., 2014b, *Tracing anthropogenic carbon dioxide and methane emissions to fossil fuel and cement producers, 1854–2010*, *Climatic change* 122(1): 229-241.
- 8) Intergovernmental Panel on Climate Change (2006), *2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: vol. 2: energy (stationary, mobile, and fugitives), vol. 3: Industry*, IPCC, Geneva. ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl
- 9) International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, & International Association of Oil and Gas Producers (2011), *Energy efficiency: improving energy use from production to consumer*, IPIECA & OGP, London.
- 10) IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2013*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York.
- 11) IPCC, 2021a. ,[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, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- 12) IPCC, 2021b. 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. Waterfeld, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].

- 13) IPCC, 2022a. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)], Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- 14) IPCC, 2022b. Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- 15) IPCC, 2022c. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926
- 16) IPCC, 2022d. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001.
- 17) Joos F, Roth R, Fuglestedt JS et al (2013), *Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis*, Atmos Chem Phys 13:2793–2825. doi:10.5194/acp-13-2793-2013.
- 18) Kopp RE, Kemp AC, Bittermann K et al (2016), *Correction for Kopp et al., temperature-driven global sea-level variability in the common era*, PNAS 113:E5694–E5696. doi:10.1073/pnas.1613396113
- 19) La Rovere EL, de Macedo LV, Baumert KA, 2002, *The Brazilian proposal on relative responsibility for global warming*. In: Baumert K (ed) World Resources Institute, *Building on the Kyoto Protocol: options for protecting the climate*, Washington, DC. pp 154–174.
- 20) Licker, R., Ekwurzel, B., Doney, S. C., Cooley, S. R., Lima, I. D., Heede, R., & Frumhoff, P. C., 2019, *Attributing ocean acidification to major carbon producers*, Environmental Research Letters, 14(12), 124060.
- 21) Lott, F.C. and P.A. Stott, 2016, *Evaluating Simulated Fraction of Attributable Risk Using Climate Observations*, Journal of Climate, 29(12), 4565–4575, doi:10.1175/jcli-d-15-0566.1.
- 22) M. Pathak, R. Slade, P.R. Shukla, J. Skea, R. Pichs-Madruga, D. Ürge-Vorsatz, 2022, Technical Summary. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.002.

- 23) Marland G, Boden TA, Andres RJ (2011), *Global, Regional, and National CO2 Emissions*. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*, CDIAC, Oak Ridge Natl. Lab., U.S. DOE, cdiac.esd.ornl.gov/frequent_data_products.html
- 24) Marland G, Rotty R (1984), *Carbon dioxide emissions from fossil fuels: a procedure for estimation and results for 1950–1982*, *Tellus* 36b:232–261.
- 25) Meira Filho, L. G. and Miguez, J. G. D., 1998, *Note on the Time Dependent Relationship Between Emissions of Greenhouse Gases and Climate Change*, Ministry of Science and Technology: Brasilia, Brazil, Electronic edition from: <http://www.mct.gov.br/clima/ingles/negoc/pdf/proposta>.
- 26) Millar RJ, Nicholls ZR, Friedlingstein P, Allen MR (2016), *A modified impulse-response representation of the global response to carbon dioxide emissions*, *Atmospheric chemistry and physics discussions* 1–20. doi: [10.5194/acp-2016-405](https://doi.org/10.5194/acp-2016-405)
- 27) Portner, H.-O. and various authors 2022: Technical Summary. [H.-O. Portner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Loschke, V. Moller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 37–118, doi:10.1017/9781009325844.002.
- 28) Ricke KL, Caldeira K (2014), *Maximum warming occurs about one decade after a carbon dioxide emission*, *Environ Res Lett* 9:124002. doi:10.1088/1748-9326/9/12/124002.
- 29) Skeie, R.B., et al. (2017), *Perspective has a strong effect on the calculation of historical contributions to global warming*, *Environ. Res. Lett.*, 12(2), 24022.
- 30) Trudinger, C., Enting, I., 2005, *Comparison of formalisms for attributing responsibility for climate change: non-linearities in the Brazilian proposal approach*. *Climatic Change* 68: 67–99.
- 31) UNFCCC (2002), *Methodological Issues: Scientific and Methodological Assessment of Contributions to Climate Change*, Report of the Expert Meeting, Note by the Secretariat, <http://unfccc.int/resource/docs/2002/sbsta/inf14.pdf>
- 32) Weber, SL (2010), *The utility of Earth system Models of Intermediate Complexity (EMICs)*. *Advanced Review*, 1, 243-252. <https://doi.org/10.1002/wcc.24>
- 33) World Coal Association (2005), *The coal resources: a comprehensive overview of coal*, London, worldcoal.org/resources/wca-publications.

Milano, 20 Settembre 2023

Prof. Ing. Daniele Bocchiola, PhD

