

**Relazione tecnico scientifica:  
dal riscaldamento globale recente agli eventi estremi a scala regionale**

Relazione tecnico-scientifica  
redatta nell'interesse di Greenpeace Onlus, ReCommon APS et al.

presso

Tribunale di Roma, sez. II Civile  
G.I. dott. Corrado Cartoni - R.G. N. 26468/2023

Dott. Antonello Pasini  
Fisico del clima, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma

Roma 30/12/2023

***Attribution science:***  
**dal riscaldamento globale recente agli eventi estremi a scala regionale**

**Antonello Pasini**

Fisico del clima, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma

Mentre il tempo meteorologico è quanto ognuno di noi può osservare sulla propria testa in un determinato momento e luogo, il clima è un concetto statistico e comporta la valutazione di quanto accade in un lungo periodo di tempo (almeno 30 anni, come indicato dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale) e spesso su una scala spaziale più ampia: una sorta di tempo meteorologico medio a cui si associano informazioni anche sulla sua variabilità. Così, ad esempio, per valutare se il clima in Italia si stia riscaldando o meno non basta osservare che per una settimana c'è stata un'ondata di freddo, ma bisogna stimare dalle misure quanto accaduto nell'ultimo trentennio e confrontarlo con i trentenni precedenti.

La scienza del clima contemporanea basa le sue analisi statistiche su misure e modelli. Anche se esistono informazioni di osservazioni precedenti ad opera di storici ed esploratori, le misure strumentali vengono effettuate da quando è nata la meteorologia scientifica, nel '600 nel Granducato di Toscana ad opera di alcuni allievi di Galileo, e si sono via via estese in tutto il mondo. I modelli invece sono molto più recenti.

Tramite osservazioni e misure di variabili meteo-climatiche (come la temperatura e le precipitazioni) – anche quelle indirette che oggi otteniamo ad esempio con l'analisi di carote di ghiaccio o sedimenti marini e lacustri, che ci consentono di risalire quasi ad un milione di anni fa – possiamo stabilire se esistano alcune tendenze climatiche e se queste (per esempio quelle avvenute nell'ultimo secolo) presentino differenze statisticamente significative rispetto a quanto accaduto al clima precedentemente.

Queste analisi di dati del passato più o meno recente permettono di fare una rilevazione (*detection*) del fatto che ci siano o meno cambiamenti significativi negli ultimi periodi in cui l'influsso antropico – in termini di emissioni di gas serra come l'anidride carbonica, ma anche di deforestazione ed altri cambiamenti nell'uso del suolo – è stato di molto superiore al periodo preindustriale. I risultati sono molto chiari per quanto riguarda la temperatura globale, che si è "impennata" a partire dagli anni '60 del secolo scorso, mostrando ora valori che vanno significativamente al di fuori di quella che è la variabilità naturale del clima. Nel bacino del Mediterraneo ed in Italia ciò è ancora più evidente, in quanto il nostro paese si sta riscaldando circa il doppio della media globale. Per quanto riguarda le precipitazioni, le misure forniscono differenze meno nette, ma ad esempio in Italia si riscontra una precisa tendenza ad avere un cambiamento non tanto nella quantità totale di precipitazione annuale, quanto nella distribuzione di queste precipitazioni, con meno giorni di pioggia (o neve, o grandine) ma talvolta maggiore quantità nei singoli giorni. (Caporali et al., 2021, e riferimenti bibliografici ivi citati).

In sostanza, i dati passati ci mostrano che recentemente vi sono stati cambiamenti (spesso significativi dal punto di vista statistico) in temperatura e precipitazioni, ma non ci permettono, da soli, di capire le cause di questi cambiamenti. Per far ciò, occorre inquadrare questi dati nella nostra conoscenza teorica di come funziona il sistema clima e allargare la nostra analisi ai dati di fattori che possono incidere sui valori climatici di certe grandezze. Solo così possiamo attribuire le cause di un certo cambiamento a determinati fattori naturali o antropici. Si apre dunque tutto un settore di studi chiamati di *attribution*.

In questi studi utilizziamo la nostra conoscenza teorica dei singoli sottosistemi (i “pezzi”) del sistema clima (atmosfera, oceani, ghiacci e biosfera), che deriva da sperimentazioni in laboratorio, per ricostruire la dinamica del clima in toto. Solo che tutto ciò non possiamo farlo in un laboratorio reale (non abbiamo una Terra gemella per fare i nostri esperimenti) e quindi lo facciamo in un “laboratorio virtuale”, i nostri supercomputer. Qui introduciamo le equazioni che descrivono la dinamica dei singoli pezzi ed effettuiamo simulazioni del funzionamento del clima nel calcolatore. Non solo otteniamo modelli che sono in grado di ricostruire il clima passato, ma, dato che siamo in un laboratorio (sia pure virtuale) possiamo effettuare esperimenti numerici che non potremmo fare in natura, esperimenti che ci possono far scoprire le cause di quei cambiamenti che l’attività di *detection* ci aveva mostrato. In sostanza, traducendo il titolo di un mio libro (Pasini, 2005), nella moderna scienza del clima si è passati “Dalle osservazioni alle simulazioni”.

Ma cosa mostrano questi studi? Innanzi tutto, che le cause del riscaldamento globale recente (quello dagli anni ’60 del secolo scorso ad oggi) sono da ricondurre agli influssi umani, specificatamente quelli che hanno portato all’aumento della concentrazione di anidride carbonica ed altri gas serra in atmosfera, a causa principalmente delle emissioni dovute alle combustioni fossili (carbone, petrolio, gas naturale). Si stima infatti che il 75% circa delle emissioni sia dovuto a queste combustioni e il restante 25% ad un cattivo uso del suolo, soprattutto dovuto ad attività di deforestazione e agricoltura non sostenibile (Tubiello et al., 2015).

La situazione è ben chiarita dalla figura 1, tratta da IPCC (2021) e con le scritte tradotte in italiano. Qui la linea nera rappresenta la temperatura media globale effettivamente riscontrata nella realtà, la fascia beige rappresenta i risultati di ricostruzione di alcuni modelli climatici cui si sono forniti i dati reali per l’andamento degli influssi naturali e antropici (le cosiddette “forzanti” esterne) dal 1850 ad oggi, la linea marrone è la media dei risultati di questi modelli. Come si vede, se si forniscono ai modelli i dati reali degli influssi esterni, essi sono ben in grado di ricostruire la temperatura media globale osservata: dunque abbiamo modelli validi. Ma ora siamo in un laboratorio virtuale e possiamo fare esperimenti che non potremmo fare in natura. Possiamo chiederci, ad esempio: cosa sarebbe accaduto se gli influssi umani fossero rimasti fermi ai loro valori preindustriali? La risposta i modelli la forniscono con la fascia azzurra di questa figura, che rappresenta la ricostruzione di temperatura fatta dagli stessi modelli sotto queste condizioni (la linea blu è la media dei loro output). Il risultato è molto chiaro: se gli influssi umani non fossero cambiati, la temperatura sarebbe rimasta sostanzialmente costante e il riscaldamento globale recente non sarebbe avvenuto.

Vale la pena sottolineare che tali risultati sono estremamente robusti, in quanto corroborati fortemente almeno da altri due tipi di modelli completamente indipendenti da quelli utilizzati per elaborare questa figura (Mazzocchi e Pasini, 2017, e riferimenti bibliografici ivi citati).

b) Variazione della temperatura superficiale globale (media annua) osservata e simulata utilizzando fattori umani e naturali e solo fattori naturali (entrambi 1850-2020)

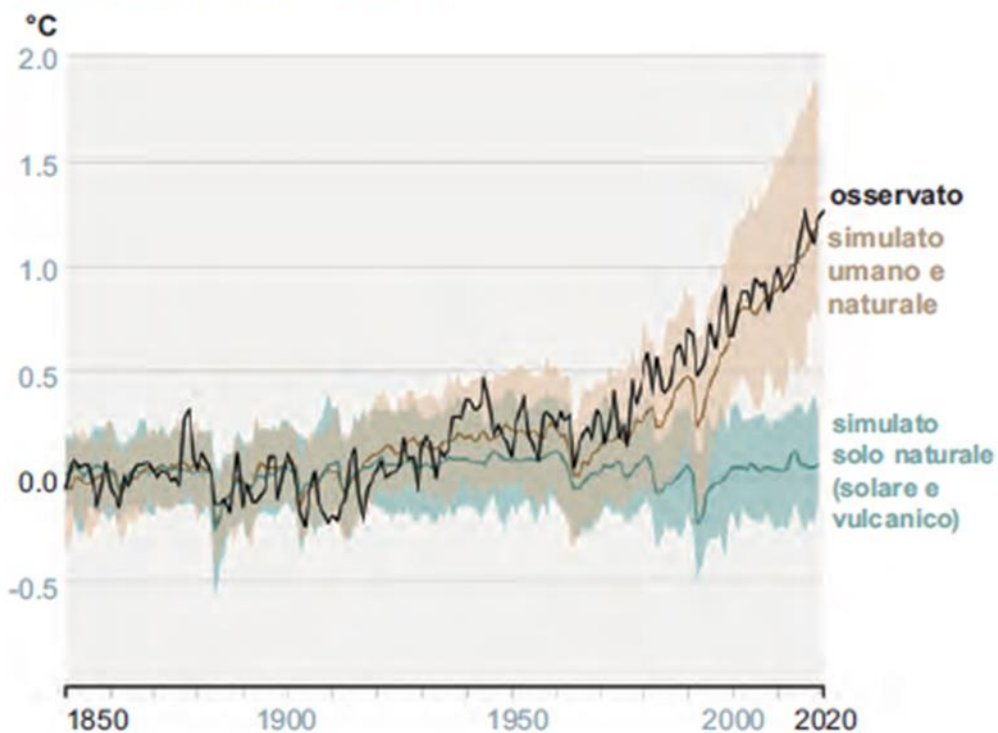


Figura 1. Attribuzione della temperatura media globale (adattata da IPCC, 2021).

a) Global surface temperature change relative to 1850-1900

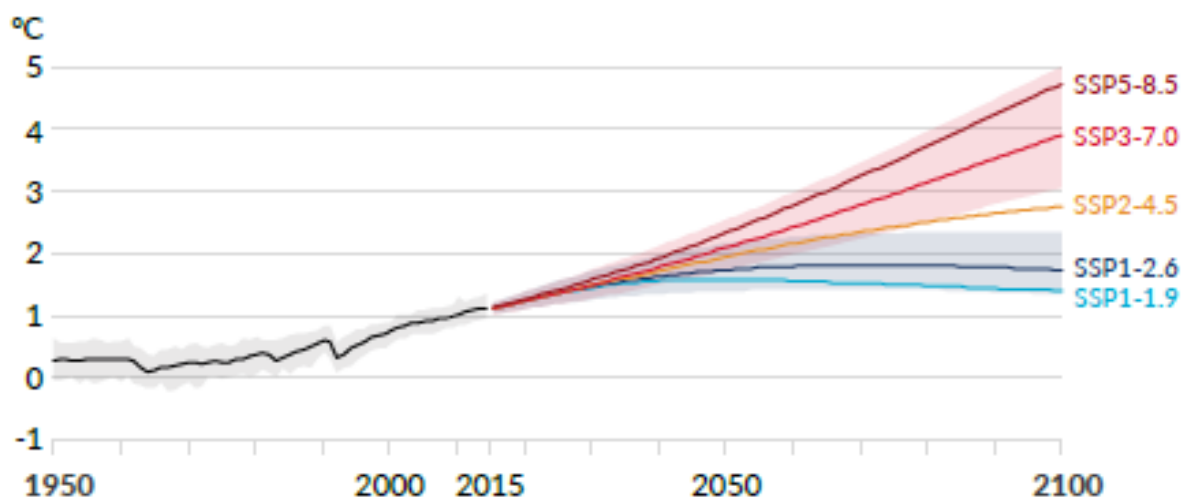


Figura 2. Proiezioni di temperatura media globale fino al 2100 (da IPCC, 2021).

Una volta capito come la temperatura alla superficie del pianeta abbia risposto alle nostre azioni, tramite questi modelli, validati sul passato, possiamo valutare i valori di temperatura globale nel futuro sotto l'influenza di diversi scenari di emissione ipotizzabili per i prossimi 80 anni, dal peggiore – il cosiddetto “business as usual” – (rosso in figura 2), scenario in cui non si fa nulla per diminuire le nostre emissioni, al migliore (azzurro nella stessa figura), in cui si agisce secondo le indicazioni della comunità scientifica internazionale, che consiglia di mantenere la temperatura al di sotto di 1,5 °C rispetto all'epoca preindustriale, per non subire gli impatti peggiori del riscaldamento globale ed evitare di superare punti di non ritorno nel sistema clima.

Chiaramente i modelli climatici ci forniscono anche i valori di temperatura nelle varie regioni del globo ed elaborazioni successive ci possono dare indicazioni di cambiamenti a questo livello regionale. Nella figura 3, ad esempio, si mostra il numero ulteriore (rispetto al presente) di giorni con temperatura superiore ai 35 °C nelle varie zone del mondo, in uno scenario di aumento di 3 °C rispetto alla temperatura media preindustriale. Si noti che, in queste condizioni, in Italia si potrà assistere ad un aumento di circa 20 giorni all'anno di queste condizioni estreme. In sostanza, le ondate di calore potranno aumentare enormemente in intensità, e magari anche in frequenza.

### HEATWAVE PROJECTIONS

Researchers think the world could reach a 1.5 °C rise and surpass it in a matter of years, and around 2 °C of warming is likely even if governments were to meet their climate commitments. On the basis of current policies alone, climate scientists estimate that temperatures could rise nearly 3 °C this century. In each of these scenarios, models project that many places on Earth could experience 30–40 extra days each year above 35 °C, affecting public health and ecosystems globally.

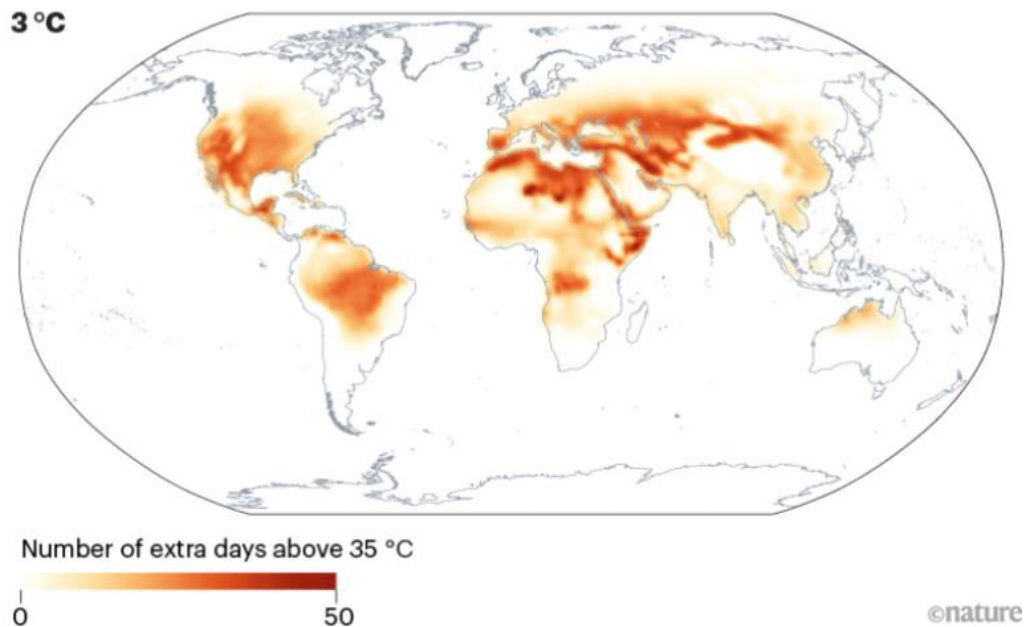


Figura 3. L'effetto delle ondate di calore in un mondo più caldo (©Nature su dati IPCC).

Questo è solo un esempio degli impatti che si potranno avere in futuro se non saremo in grado di ridurre drasticamente le nostre emissioni di gas climalteranti come l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), che viene prodotta ogni qual volta bruciamo combustibili fossili. Ma i moderni studi di *attribution*

consentono anche di capire quanto le ondate di calore (e pure altri fenomeni) degli ultimi anni siano dovute o meno al fatto che già il mondo si è riscaldato a causa delle nostre emissioni.

Fino a pochi anni fa non era possibile attribuire un singolo evento meteorologico a cause climatiche. Ci si limitava ad esaminare le serie storiche di questi eventi e a studiarne gli aumenti di frequenza o di intensità, valutando se gli aumenti fossero statisticamente significativi e chiari indici di cambiamento climatico. Oggi, invece, l'utilizzo dei modelli climatici ci può far capire se le caratteristiche di un singolo evento recente (ad esempio la sua intensità) si sarebbero potute riscontrare anche in condizioni preriscaldamento globale o se sono invece peculiari delle condizioni climatiche attuali (e quindi senza i cambiamenti climatici recenti non avrebbero potuto aversi o sarebbero state molto meno probabili).

Gli studi della *attribution science* degli eventi estremi procedono generalmente in quattro fasi:

- (1) per prima cosa si misura l'intensità e la frequenza di un determinato evento sulla base dei dati osservati;
- (2) poi si applicano modelli al computer per ricostruire questi dati di osservazione;
- (3) a questo punto, se si hanno modelli che riescono a ricostruire tali dati, cioè sono validati sui dati reali, si applicano gli stessi modelli simulando situazioni preriscaldamento globale, cioè senza i cambiamenti climatici recenti;
- (4) infine, si utilizzano statistiche per analizzare le differenze – nell'occorrenza e intensità degli eventi estremi che si considerano – tra la seconda e la terza fase, stimando così l'effetto diretto dei recenti cambiamenti climatici di origine antropica sul particolare evento studiato.

Nel far ciò si utilizzano principalmente due tipi di approcci e modelli.

Da un lato, riferendosi ad un tipo di eventi estremi accaduto nel recente passato e di cui si vogliono studiare le differenze di probabilità di frequenza ed intensità tra la situazione di cambiamento climatico attuale e quella precedente preindustriale, si confrontano i risultati di modelli climatici che simulano tale fenomeno, una volta nello scenario climatico attuale e una volta in quello ante riscaldamento globale. In tal modo si riesce a capire quanto sia cambiata la probabilità di frequenza o intensità di questo fenomeno. D'altro lato, per fenomeni che avvengono a scala più ridotta e che necessitano di una più alta risoluzione spaziale e temporale, si utilizzano modelli meteorologici in cui i cambiamenti dallo scenario preriscaldamento globale a quello recente vengono imposti dall'esterno (ad esempio per quanto riguarda le temperature della superficie). Quest'ultima strategia viene spesso utilizzata per lo studio dei fenomeni di precipitazione intensa, anche qui cercando di capire, nella situazione meteorologica specifica, quanto contino le condizioni di cambiamento climatico recente nella realizzazione del fenomeno studiato.

Conviene ora analizzare ed esemplificare questi approcci, per poi trarre conclusioni sulla nostra capacità di attribuire i vari fenomeni al riscaldamento globale recente di origine antropica e trarne evidenze che possano essere utili per tutte le attività di mitigazione (cosa dobbiamo fare per fermare il riscaldamento globale e l'aumento dei fenomeni ad esso collegati) e adattamento (cosa dobbiamo fare per limitare i danni di questi fenomeni).

L'utilizzo di modelli climatici globali, che necessariamente (per motivi di tempo di calcolo) hanno una risoluzione spaziale limitata (oggi circa 50 km), ha mostrato inequivocabilmente che a livello globale la temperatura media e gli eventi estremi di temperatura stanno aumentando in tutti i continenti e ciò è dovuto ai cambiamenti climatici causati dall'uomo. In particolare:

- Un'ondata di calore che una volta aveva una probabilità su 10 di verificarsi in un dato anno nel clima preindustriale, ora si verificherà 2,8 (calcolando l'incertezza tra 1,8 e 3,2) volte più frequentemente e sarà più calda di 1,2 °C. A 2 °C di riscaldamento globale, si verificherà 5,6 (calcolando l'incertezza tra 3,8 e 6,0) volte più frequentemente e sarà più calda di 2,6 °C.
- Un'ondata di calore che avrebbe avuto una probabilità su 50 di verificarsi in un dato anno nel clima preindustriale si verificherà ora 4,8 (calcolando l'incertezza tra 2,3 e 6,4) volte più frequentemente e sarà più calda di 1,2 °C. Con un riscaldamento globale di 2 °C, si verificherà 13,9 (calcolando l'incertezza tra 6,9 e 16,6) volte più frequentemente e sarà più calda di 2,7 °C. (IPCC, 2021).

La recente situazione europea veniva ben descritta già in Christidis et al. (2015), dove si valutava come, solo 10 anni dopo, la "ripetizione" della famigerata ondata di calore dell'estate 2003 fosse divenuta molto più probabile. Inoltre, Leach et al. (2020) hanno mostrato chiaramente l'influenza antropica nell'evento di calore dell'estate 2018 in Europa. Oggi, dopo le ultime due estati, possiamo purtroppo confermare l'attendibilità di questi studi.

In generale, è stato mostrato (si veda, ad esempio, Hu e Fu, 2007) come il riscaldamento di origine antropica abbia fatto cambiare anche la circolazione dell'aria nel Mediterraneo, a causa di una amplificazione verso nord della cosiddetta "cella di Hadley" della circolazione generale dell'atmosfera, che porta ad un ingresso sempre più frequente degli anticicloni africani anche sul territorio italiano. Il risultato è un riscaldamento osservato molto aumentato rispetto alla media globale e lunghi periodi di siccità. Questa tendenza sembra debba continuare all'eventuale procedere ulteriore del riscaldamento globale (Lu et al., 2007).

La confidenza che tali cambiamenti nelle ondate di calore siano dovuti agli influssi antropici è quindi molto alta nel bacino del Mediterraneo, e anche gli eventi estremi di siccità sono stati collegati a questo (IPCC, 2021). Tutto ciò ha impatti veramente forti in tanti settori diversi: i più gravi, probabilmente, in agricoltura e per la salute umana. Un recente articolo di rassegna cui si può fare riferimento per tutto ciò, e che include anche studi molto recenti non considerati in IPCC (2021), è quello di Clarke et al. (2022).

Per quanto riguarda gli eventi di precipitazioni intense, se ne è riscontrato un aumento a scala globale, ma a livello di singole regioni del mondo vi sono differenze molto notevoli (IPCC, 2021; Clarke et al., 2022), tanto che nel bacino del Mediterraneo vi è poca confidenza nell'attribuire tali cambiamenti alle azioni umane. Tuttavia, occorre ricordare che i classici modelli climatici (a causa della loro limitata risoluzione spaziale) non riescono a "vedere" fenomeni, come gli eventi temporaleschi forti e le alluvioni lampo, che avvengono solitamente a piccola scala. Per analizzare questi fenomeni sono dunque necessari studi più dettagliati, che vengono consentiti solo dall'applicazione del secondo approccio citato più sopra.

Ma, prima, è interessante fare qualche osservazione da un punto di vista fisico qualitativo. Il fatto che la circolazione nel Mediterraneo si disponga più spesso di un tempo lungo la direttrice sud-

nord e nord-sud (con l'arrivo e il ritiro degli anticicloni africani) favorisce sia gli eventi estremi termici sia quelli precipitativi. Dei primi ho già scritto in precedenza, mentre per i secondi ciò che importa è l'aumento del contrasto termico tra masse d'aria di caratteristiche diverse (più fredde e più calde), che alle nostre medie latitudini domina la dinamica atmosferica, e il surriscaldamento del Mediterraneo. Questi due ultimi fattori favoriscono la convezione e la formazione di nubi temporalesche, cioè di quelle nubi che portano le precipitazioni più intense. Un'introduzione a queste nuove situazioni e all'estremizzazione dei fenomeni nel Mediterraneo e in Italia si può trovare nel mio ultimo libro (Pasini, 2020).

Queste considerazioni portano a pensare ad un aumento dell'intensità delle precipitazioni col riscaldamento globale di origine antropica, mentre per quanto riguarda la frequenza siamo molto meno sicuri, anche se la nuova circolazione (con un'Italia sempre più "protetta" dagli anticicloni africani) potrebbe condurre a una minore frequenza di eventi precipitativi estesi. In sostanza, si otterrebbe un incremento di quella tendenza che già si comincia ad intravedere nelle osservazioni passate: una diminuzione di giorni piovosi, ma un aumento dell'intensità di precipitazione in questi giorni, che ha però effetti più devastanti sui territori. Un tale risultato è stato recentemente quantificato per il futuro nel caso dei cicloni extratropicali nel Mediterraneo dallo studio di Reale et al. (2022), che mostra come le nostre zone possano essere interessate da meno cicloni ma più violenti, con maggiore intensità di precipitazioni e venti più forti. N.B.: un ciclone extratropicale ha una dinamica diversa da quella dei cicloni tropicali, è semplicemente una zona di bassa pressione che induce contrasti di aria di caratteristiche termiche diverse e quindi crea precipitazioni.

Venendo allora alle applicazioni di modelli meteorologici ad alta e altissima risoluzione all'analisi di eventi di precipitazioni estreme nel Mediterraneo e in Italia, si può dire che il loro utilizzo mostra generalmente un influsso notevole sull'intensità dei fenomeni da parte delle mutate condizioni climatiche, spesso temperature aumentate di un Mar Mediterraneo surriscaldato dal riscaldamento globale e dalla presenza degli anticicloni africani, che consentono un maggior soleggiamento, con un incrementato assorbimento dell'energia proveniente dal Sole da parte del mare.

I casi di studio modellistico di questi eventi si stanno moltiplicando, anche se non molti riguardano eventi che hanno interessato la nostra nazione. Ancora una volta, dal punto di vista qualitativo, avere un mare più caldo, in particolare, significa una sua maggiore evaporazione che mette a disposizione dell'atmosfera un maggior numero di molecole di vapore acqueo pronte a condensare e a formare le nubi, dunque più "materiale" per formare le nubi stesse. D'altro canto, un mare surriscaldato fornisce più calore all'atmosfera, cioè maggiore energia, e questo surplus di energia l'atmosfera non è in grado di contenerlo a lungo, ma lo scarica sui territori sotto forma di piogge violente e venti forti.

I modelli ad alta risoluzione, che trattano in maniera accurata il fenomeno della convezione, permettono di quantificare e vedere se le precedenti considerazioni qualitative superano il vaglio di un'analisi quantitativa comprensiva di tutti i fenomeni fondamentali che avvengono nella realtà meteo-climatica. Inoltre, vengono considerati vari fenomeni che producono precipitazioni intense.

I modelli a più bassa risoluzione possono dare informazioni sull'eventuale aumento di probabilità di eventi alluvionali su vaste zone del mondo nell'attuale regime climatico rispetto all'epoca preindustriale (si veda, ad esempio, Tradowsky et al., 2023) e qualche tentativo c'è stato anche per



regioni più limitate ed orograficamente complesse, in cui la convezione viene favorita dalla conformazione del territorio; ma i risultati non hanno per ora superato il vaglio della revisione scientifica e non sono stati pubblicati su riviste internazionali. Ciò perché sostanzialmente tali modelli non colgono con precisione i fenomeni causati dai moti convettivi.

Per questi casi va utilizzato dunque il secondo approccio citato in precedenza. Anche se la letteratura scientifica non è molto ampia per i fenomeni che avvengono su regioni limitate e con tali caratteristiche, alcuni di essi riguardano l'Italia e danno indicazioni molto chiare.

Allo studio che ha inaugurato in Italia questo tipo di ricerche (Miglietta et al., 2017) ho partecipato anch'io. Si tratta dello studio del tornado (una grossa tromba marina) che ha colpito Taranto nel novembre 2012, causando un morto e 60 milioni di euro di danni (finì sull'ILVA). Il modello utilizzato aveva una risoluzione spaziale di 1 km e riusciva a "vedere" la supercella temporalesca che sovrastava il tornado. Il modello è riuscito a ricostruire bene la nascita, la traiettoria e la violenza del tornado, in tutti i parametri fisici che la possono misurare. Questa fase è stata quella di validazione del modello.

Poi, dalle osservazioni di temperatura del mare, sapevamo che in quel giorno la temperatura superficiale del Mar Ionio era almeno di 1 °C superiore alla media climatica degli ultimi 20 anni (non dell'epoca preindustriale, in quel caso sarebbe stato di più). Allora abbiamo voluto vedere quanto questa anomalia positiva di temperatura fosse importante per il fenomeno che stavamo studiando. Così abbiamo cambiato questa condizione al contorno del nostro modello meteorologico – la temperatura superficiale del mare (nel modello abbiamo il controllo di tutto) – e abbiamo fatto girare il modello con una temperatura di 1 °C in meno. Ebbene, in queste condizioni il modello ci mostra che il tornado non si sarebbe proprio formato. Allora abbiamo fatto girare il modello con una temperatura superficiale del mare di 1 °C in più di quella osservata. In queste condizioni il tornado si sarebbe formato, avrebbe colpito ancora i dintorni di Taranto, ma sarebbe stato più violento, con un aumento di violenza non graduale e lineare, ma molto più forte.

Insomma, la sperimentazione ci ha confermato che questi tornado sono fenomeni a soglia, che avvengono al di sopra di una certa temperatura del mare che fornisce loro energia, che nel Mediterraneo siamo vicini a questa soglia (nel nostro caso l'avevamo superata) e che, se le temperature del mare dovessero aumentare ancora, come fanno vedere tutti gli scenari futuri di cambiamento climatico, i tornado aumenterebbero la loro intensità e quindi la loro forza distruttiva. Per quanto riguarda la frequenza, ciò dipende invece dal numero di volte che si avranno situazioni meteorologiche adatte al loro svilupparsi, con contrasti di masse d'aria diverse e alta vorticità (due caratteristiche meteorologiche).

Studi più recenti su altri casi di studio di tornado in Italia hanno sostanzialmente confermato quanto trovato in Miglietta et al. (2017). Si veda, ad esempio, Avolio e Miglietta (2022), in cui si sono analizzati i tornado nelle regioni tirreniche della penisola italiana, in particolare quanto avvenuto il 28 luglio 2019 a Fiumicino.

Un altro studio recente ha cominciato ad indagare, sempre con modelli meteorologici ad alta risoluzione, il ruolo dell'orografia e delle temperature superficiali del mare sullo sviluppo di nubi convettive che portano ad eventi estremi di grandine dal diametro molto grande e dunque distruttivo (Ricchi et al, 2023). Questo studio ha analizzato l'evento estremo che si è verificato il 10 luglio 2019 lungo la costa marchigiana in prossimità di Ancona e che si è propagato verso sud fino

a raggiungere i pressi di Pescara. In questo caso la forte convezione è stata favorita dalla complessa orografia della zona ma, ancora una volta, il mare molto caldo (in questo caso l'Adriatico) è stato cruciale nel creare le condizioni per lo sviluppo di un fenomeno così violento.

Infine, alcuni studi si sono concentrati su un fenomeno che comincia ad avvenire con una certa frequenza nel Mediterraneo, quello degli uragani mediterranei (Medicane: Mediterranean hurricanes). Come citato in precedenza, i cicloni extratropicali sono diversi da quelli tropicali (che in Atlantico vengono chiamati uragani), perché derivano sostanzialmente dallo scontro di masse d'aria diverse, mentre quelli tropicali nascono fundamentalmente dall'energia che i sistemi meteorologici acquisiscono dal basso, generalmente dal mare molto caldo. I cicloni che entrano nel Mediterraneo e vi si approfondiscono sono essenzialmente di tipo extratropicale, ma a volte nascono anche uragani mediterranei che sono più simili ai cicloni tropicali, cioè sono guidati essenzialmente dalle temperature calde del mare, dalle quali prendono energia. Tali fenomeni sono importanti da studiare perché molto distruttivi, sia in termini di precipitazioni che di venti.

Il primo studio modellistico di un Medicane (sui mari dell'Italia meridionale) è stato pubblicato oltre 10 anni fa (Miglietta et al., 2011). Anche qui, dopo aver validato il modello sulla situazione reale e aver visto che riproduceva bene la tempistica e l'intensità dell'uragano mediterraneo, si sono effettuati esperimenti numerici di sensibilità alle temperature superficiali del mare. I risultati hanno mostrato come le caratteristiche tropicali del Medicane siano fortemente favorite in situazioni di temperature alte della superficie del mare, come quelle della situazione reale di questo caso di studio, temperature che sono sempre più probabili in un regime di cambiamento climatico che avanza.

Un altro studio recente cui ci si può riferire è quello di Varlas et al. (2023), in cui si è analizzato il Medicane Ianos, che ha colpito il Mediterraneo centrale nel settembre 2020 e ha causato 4 morti in Grecia e in generale 700 milioni di euro di danni. Anche qui, cambiando i valori delle temperature superficiali del mare nel modello, gli autori hanno potuto comprendere quanto la virulenza del Medicane avrebbe potuto essere diversa in condizioni preriscaldamento globale (per esempio la precipitazione poteva essere inferiore di oltre il 50%), ma anche come potrebbe cambiare (in peggio) nel prossimo futuro, se non dovessero essere prese misure di mitigazione del riscaldamento globale di origine antropica.

Anche se nel bacino del Mediterraneo ed in Italia i classici modelli climatici, con cui si svolgono solitamente gli studi di *attribution*, non permettono di mostrare cambiamenti significativi nelle precipitazioni passate, l'utilizzo di modelli ad alta risoluzione fornisce chiare indicazioni di come la violenza di questi fenomeni sia legata abbastanza strettamente all'aumento delle temperature, soprattutto quelle del mare.

In conclusione, la moderna *attribution science* ci mostra risultati importanti:

- il riscaldamento globale recente è dovuto agli influssi antropici, soprattutto in termini di emissione di gas serra emessi dalle combustioni fossili e in parte a causa di un cattivo uso del suolo (deforestazione e agricoltura non sostenibile).
- Gli eventi estremi di caldo sono da attribuire praticamente ovunque agli influssi umani. Il Mediterraneo, in particolare, si riscalda più della media globale ed è considerato un *hot spot* di riscaldamento. Vi è una confidenza molto alta che siano aumentate anche le ondate

di calore in Italia, sia per l'aumento della temperatura media, sia a causa dei meccanismi di cambiamento della circolazione indotti dal riscaldamento globale di origine antropica.

- In generale, l'attribuzione degli eventi estremi di precipitazione alle cause umane è meno sicura. Tuttavia, nel bacino del Mediterraneo e in Italia, studi con modelli ad alta risoluzione mostrano la forte influenza dell'aumento delle temperature superficiali del mare (pilotate dal riscaldamento globale di origine antropica) sull'intensità di questi eventi estremi.

## **Bibliografia**

E. Avolio, M.M. Miglietta (2022), Tornadoes in the Tyrrhenian regions of the Italian peninsula: The case study of 28 July 2019, *Atmospheric Research* 278, 106285.

E. Caporali et al. (2021), A review of studies on observed precipitation trends in Italy, *International Journal of Climatology* 41 (Suppl. 1), E1-E25.

B. Clarke et al. (2022), Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective, *Environmental Research: Climate* 1, 012001.

N. Christidis et al. (2015), Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave, *Nature Climate Change* 5, 46-50.

Y. Hu, Q. Fu (2007), Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979, *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, 5229-5236.

IPCC (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (V. Masson-Delmotte et al. eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

N.J. Leach et al. (2020), Anthropogenic Influence on the 2018 Summer Warm Spell in Europe: The Impact of Different Spatio-Temporal Scales, *Bulletin of the American Meteorological Society* 101 (1), S41-S46.

J. Lu et al. (2007), Expansion of the Hadley cell under global warming, *Geophysical Research Letters* 34, L06805.

F. Mazzocchi, A. Pasini (2017), Climate model pluralism beyond dynamical ensembles, *WIREs Climate Change* 8, e477.

M.M. Miglietta et al. (2011), Numerical analysis of a Mediterranean 'hurricane' over south-eastern Italy: Sensitivity experiments to sea surface temperature, *Atmospheric Research* 101, 412-426.

M.M. Miglietta et al. (2017), Effect of a positive Sea Surface Temperature anomaly on a Mediterranean tornadic supercell, *Scientific Reports* 7, 12828.

A. Pasini (2005), *From observations to simulations. A conceptual introduction to weather and climate modelling*, World Scientific Publishers, Singapore.

A. Pasini (2020), *L'equazione dei disastri. Cambiamenti climatici su territori fragili*, Codice edizioni, Torino.

M. Reale et al. (2022), Future projections of Mediterranean cyclone characteristics using the Med-CORDEX ensemble of coupled regional climate system models, *Climate Dynamics* 58, 2501-2524.

A. Ricchi et al. (2023), Impact of the SST and topography on the development of a large-hail storm event, on the Adriatic Sea, *Atmospheric Research* 296, 107078.

J.S. Tradowsky et al. (2023), Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021, *Climatic Change* 176, 90.

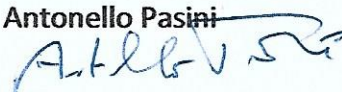
F.N. Tubiello et al. (2015), The contribution of agriculture, forestry and other land use activities to global warming, 1990–2012. *Global Change Biology* 21, 2655-2660.

G. Varlas et al. (2023), Investigating the impact of sea surface temperature on the development of the Mediterranean tropical-like cyclone “Ianos” in 2020, *Atmospheric Research* 291, 106827.

In fede

Roma, 10/12/2023

Antonello Pasini

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. Pasini', with a stylized flourish at the end.