

Cambiamento climatico: un clima di incertezza

Alexander García-Aristizábal

Da molti anni una buona parte della comunità scientifica ritiene che i cambiamenti climatici siano dovuti sia alla variabilità naturale che all'azione dell'uomo, ma non poche sono le incertezze. I mutamenti climatici sono un fenomeno nel quale le incertezze abbondano, ma spesso sono trascurate sia nella descrizione delle proiezioni del clima, sia nell'analisi dei dati che ne derivano.

Le condizioni atmosferiche influenzano profondamente le attività umane. Quando questi fenomeni assumono particolare intensità e sono in grado di causare direttamente o indirettamente dei danni, allora si associa il rischio di danni a persone o cose. Uno dei nostri interessi fondamentali è proprio quello di valutare la *pericolosità* (intesa come probabilità di superare una certa soglia di intensità del fenomeno in un certo intervallo temporale) e il *rischio* (inteso come danni attesi o probabilità di superare un determinato valore di danno) derivati da eventi atmosferici estremi.

In questo contesto, l'informazione di variabili climatologiche come precipitazione, temperatura (massima e minima), velocità del vento, umidità, ecc., costituiscono parametri di riferimento per le valutazioni di pericolosità e rischio. Questa informazione generalmente si può ottenere da cataloghi di dati passati; tuttavia, dato che frequentemente la finestra temporale dei dati è limitata per le analisi degli eventi meno frequenti (oppure non esistono osservazioni per un determinato luogo), una possibilità è quella di considerare dati sintetici derivati da modelli climatici (*General Circulation Models*, GCM). Independentemente della sorgente dei dati, un problema più critico è sollevato forse quando s'introduce nel discorso il cambiamento climatico.

Seguendo la definizione adottata dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) il cambiamento climatico «si riferisce a un cambio nello stato del clima che può essere identificato (per esempio usando test statistici) attraverso cambiamenti nella media e/o la variabilità delle sue proprietà, e che persiste per un lungo periodo di tempo (decade o più)» [1-3]. Mentre da una prospettiva paleoclimatica questo fenomeno è fondamentalmente legato alla variabilità naturale di diversi fattori (quali irraggiamento solare, caratteristiche atmosferiche, oceani, parametri interni o esterni al pianeta, ecc.), da molti anni una buona parte della comunità scientifica (IPCC) ritiene che questi cambiamenti possano essere dovuti sia alla variabilità naturale che all'azione dell'uomo [1-3] tramite attività come la deforestazione e le emissioni di gas serra derivate dall'uso di combustibili fossili.

Il ruolo delle attività antropiche sul clima è oggetto da tempo di un ampio dibattito scientifico: da una parte, alcuni scienziati ritengono che l'uomo attraverso le sue emissioni di gas serra sia responsabile di gran parte del periodo di riscaldamento che sta attraversando oggi la Terra; altri scienziati ritengono invece sopravvalutato il peso attribuito all'uomo sul clima, ritenendo l'attuale periodo di riscaldamento climatico come una fase naturale opposta ai periodi (naturali) di raffreddamento climatico.

Senza entrare nel campo specifico del dibattito sul peso delle attività umane sul clima (che è oggetto di studio dei climatologi) il nostro obiettivo è di fare una discussione generale sulle incertezze nei modelli di cambiamento climatico. Naturalmente una discussione “integrale” sulle incertezze associate ai modelli climatici sarebbe un compito molto complesso; tuttavia, da una prospettiva generica, è possibile evidenziare le criticità dei dati climatologici ottenuti da osservazioni e modelli climatici, le principali sorgenti di incertezze, i limiti per la quantificazione, ecc. In particolare, dal punto di vista di “utilizzatori” dell’informazione, quando si usano queste tipologie di dati è importante avere un’idea precisa di che cosa si sta quantificando per dare un senso chiaro ai risultati.

Il clima, un sistema certamente variabile: le osservazioni

Indipendentemente dal dibattito sul peso delle attività antropiche, è chiaro che il clima non ha mai un carattere puramente statico, ma è sempre in fase di cambiamento, passando da fasi più calde a fasi più fredde, alla ricerca di un nuovo equilibrio all’interno del sistema. Sono diversi i fattori che provocano i mutamenti climatici terrestri, che vanno da variazioni nell’orbita terrestre e nell’attività solare, alle attività vulcanica, ecc., all’uomo, che, con l’emissione di gas serra, ne modificano la composizione. Stando solo alle osservazioni registrate, secondo l’ultimo rapporto dell’IPCC le temperature superficiali medie globali sono aumentate di $0,7^{\circ}\text{C} \pm 0,18^{\circ}\text{C}$ considerando un trend lineare negli ultimi 100 anni [4]. Se si considera il tasso di riscaldamento negli ultimi 50 anni, questo è quasi il doppio di quello registrato nel corso degli ultimi 100 anni ($0,13^{\circ}\text{C} \pm 0,03^{\circ}\text{C}$ vs. $0,07^{\circ}\text{C} \pm 0,02^{\circ}\text{C}$ per decennio) [4].

Altre osservazioni indicano inoltre che variazioni in eventi estremi di temperatura sono coerenti con il riscaldamento del clima. Ad esempio, esistono dati che indicano una diffusa riduzione del numero di giorni di gelo in regioni di media latitudine e un aumento del numero di estremi caldi dal 70 al 75% delle regioni dove i dati sono disponibili [4]. Altri esempi vengono dalle piogge: le precipitazioni sono in generale aumentate in zone al nord di 30°N nel periodo 1900-2005, mentre una tendenza al ribasso dal 1970 domina i tropici. È probabile tuttavia che ci sia un aumento del numero di episodi di precipitazioni intense in diverse regioni, anche in quelle in cui vi è stata una riduzione della quantità di precipitazione totale, in linea con un clima sempre più caldo e le quantità crescenti di vapore acqueo osservate nell’atmosfera [4].

Tutte queste variazioni e altre che si possono trovare in letteratura sono testimonianza del carattere variabile del sistema climatico. Dal punto di vista della valutazione di pericolosità e rischio, questo fatto è da tenere in considerazione poiché le ipotesi di stazionarietà nelle analisi dei dati potrebbero essere violate. Purtroppo in molte zone il problema principale è la scarsa disponibilità di dati osservati e in quelli esistenti una finestra temporale troppo ridotta per un’analisi corretta degli eventi più estremi (e meno frequenti), che sono generalmente quelli più importanti dal punto di vista del rischio. Un’alternativa per cercare di aggirare questo problema è utilizzare dati sintetici da modelli climatici; questa è una delle tante motivazioni del crescente interesse per la modellazione del clima, oltre all’interesse fondamentale di cercare di valutare gli effetti che le variazioni delle forzanti radiative hanno sul sistema climatico. Attenzione, però, perché questa tipologia di dati

dovrebbe essere manipolata con estrema cautela avendo sempre presenti le molte limitazioni e incertezze intrinsecamente associate.

I modelli climatici e le proiezioni del clima

Un modello climatico è una rappresentazione numerica del sistema climatico sulla base di proprietà fisiche, chimiche e biologiche dei suoi componenti, le loro interazioni e processi di feedback, considerando tutte o alcune delle sue note proprietà [2, 4]. I modelli climatici sono spesso utilizzati per fare proiezioni della risposta del sistema climatico di fronte a diversi *scenari* di emissione o concentrazione di gas a effetto serra, degli aerosol e delle *forzanti radiative* (*radiative forcing scenarios*).

Due importanti concetti devono essere considerati: anzitutto, l'uso del termine "proiezione climatica", che si distingue dalle "previsioni climatiche" per sottolineare che le proiezioni climatiche dipendono dagli scenari delle forzanti di emissione/concentrazione/radiative utilizzate, le quali si basano su ipotesi associate, ad esempio, a futuri sviluppi socio-economici e tecnologici che possono o non possono accadere e quindi intrinsecamente incerti [4]. Il secondo concetto da tener presente è, appunto, quello di *scenario*. Uno *scenario* è una descrizione plausibile e spesso semplificata di come il futuro si può sviluppare, sulla base di un insieme di ipotesi internamente coerenti e consistenti, riguardanti forze motrici e relazioni chiave fra i componenti [4, 5]. Nel nostro caso prendiamo in considerazione in particolare gli scenari di emissione che sono una rappresentazione plausibile del futuro sviluppo delle emissioni di sostanze potenzialmente attive radiativamente (ad esempio, gas a effetto serra e aerosol), sulla base di

un insieme coerente ed internamente consistente di assunzioni sulle forzanti (come lo sviluppo demografico e socio-economico, il cambiamento tecnologico, ecc.) [1, 2, 4]. Da questi scenari derivano gli scenari di concentrazione, che sono utilizzati come input nei modelli climatici per calcolare proiezioni climatiche.

Modelli climatici ed incertezze nelle proiezioni

La costruzione e quantificazione delle proiezioni del clima si basa su diverse sorgenti d'informazione:

1. i modelli climatici (GCM);
2. il *downscaling* delle simulazioni del modello GCM;
3. la comprensione della fisica dei processi che regolano le risposte regionali;
4. i dati recenti (la storia) di cambiamento climatico (e.g., [6]).

Le incertezze nelle proiezioni del clima sorgono a ogni passaggio necessario per la loro preparazione e calcolo, come la parametrizzazione del modello, la variabilità naturale dei fenomeni, la determinazione degli scenari di emissione e concentrazione, le forzanti, la risposta del clima, ecc. [7]. Oltre alle canoniche incertezze dovute alla variabilità naturale del sistema (che possiamo chiamare incertezza aleatoria), esistono dunque anche delle incertezze dovute all'imperfetta conoscenza del problema (a livello di definizione dei modelli, valori nei parametri, condizioni iniziali e al contorno, ecc.) che possono essere grossolanamente accorpate come incertezze epistemiche (o almeno con una grande componente epistemica).

Da un punto di vista quantitativo, alcune incertezze possono (e devono) essere esplorate, analizzate e anche quantificate fino a una certa misura, ad esempio attraverso l'uso combinato di osservazioni e modelli, usando gerar-

chie di modelli ed eseguendo *ensemble simulations*. Quest'ultimo approccio rappresenta in particolare una risorsa fondamentale per lo studio della gamma di risposte "plausibili" del clima di fronte a una certa forzante [8]. Gli *ensembles* possono essere applicati in diversi modi, ad esempio:

1. raccogliendo risultati da una serie di modelli di centri di ricerca diversi (*ensemble "multi-modello"*), per considerare così l'impatto delle differenze strutturali fra i modelli;
2. generando simulazioni con differenti condizioni iniziali (*ensemble "intra-modello"*) per caratterizzare le incertezze dovute alla variabilità dei fenomeni;
3. variando diversi parametri interni del modello in un rango di valori plausibili (*ensembles di "modelli con perturbazioni stocastiche"*).

Una discussione interessante su questo argomento può essere trovata in [7, 9]. Diversi esempi di applicazioni di *ensembles* per la quantificazione di incertezze si trovano ad esempio in [6, 8-12].

Altre incertezze, come quelle derivate dalla costruzione di scenari di emissione e concentrazione, sono più difficili da essere rintracciate e quantificate. Infatti, nell'elaborazione dei diversi scenari da parte dell'IPCC (e lavori precedenti), spesso si fa riferimento al fatto che a ogni possibile scenario non è assegnata una probabilità di occorrenza, neppure un peso o una preferenza rispetto a un altro [2, 4]. Questa determinazione è comprensibile visto che, come descritto prima, gli scenari (e.g., di emissione) vengono costruiti considerando possibili sviluppi demografici, economici, politici, ecc., che sono delle ipotesi alle quali difficilmente si potrebbero assegnare probabilità. Da una parte considerare diversi scenari è un modo di esprimere le incertezze *epistemiche* sull'andamento di alcuni parametri che influiscono sulle

forzanti (che agiscono nella circolazione atmosferica), dall'altra parte però rimane indeterminato il *peso* o la probabilità di occorrenza di ogni scenario. Gli effetti di questa incertezza epistémica sono evidenti quando si vedono le diverse proiezioni (e.g. al 2050) di parametri climatici come la temperatura o la precipitazione considerando diversi scenari.

La domanda spontanea è: posso costruire una distribuzione di probabilità usando le proiezioni da diversi scenari per determinare l'incertezza (almeno epistémica) nei parametri climatici derivati dal modello? Per fare questo si dovrebbe implicitamente o esplicitamente assegnare dei pesi (o delle probabilità) agli scenari, dando in questo modo più "credibilità" ad alcuni di loro. Si potrebbe pensare anche, di fronte all'incertezza massima, di assegnargli lo stesso peso e quindi assumere tutti come equiprobabili. Tuttavia, ogni scenario ha delle implicazioni che li rendono possibili *path* mutuamente escludenti.

Pericolosità e rischio: eventi estremi ed incertezze che si aggiungono

Il cambiamento climatico porta a variazioni nella frequenza, intensità, estensione territoriale e durata di eventi climatici estremi, potendo eventualmente causare eventi estremi senza precedenti [7]. Inoltre, la variazione temporale dell'esposizione combinata con una maggior frequenza di eventi (anche se non estremi in senso statistico), può generare un aumento nella frequenza dei disastri. Considerando il nostro particolare interesse nella valutazione di pericolosità e rischio, oltre alle incertezze puramente associate ai dati (siano essi osservati o generati da modelli climatici), l'analisi dei dati stessi per le stime di pericolosità e rischio aggiunge ulteriori

componenti di incertezze che provengono, ad esempio, dalla selezione dei modelli probabilistici applicati per la stima di quantili (e.g. di parametri d'intensità di precipitazione, temperatura, vento, ecc.), oppure dai modelli fisici usati per propagare in superficie gli effetti di un determinato evento (e.g., per le inondazioni dopo piogge intense).

Per la valutazione della pericolosità, in particolare, gli eventi che generalmente sono importanti sono quelli a intensità maggiore che di solito sono anche quelli meno frequenti. Per questo motivo in queste analisi spesso si fa uso della teoria di Eventi Estremi (EVT, [13]) che fornisce uno strumento per derivare una distribuzione completa di probabilità di eventi a bassa probabilità, e quindi permette l'analisi della probabilità di occorrenza di eventi che sono al di fuori del campo dei dati osservati.

Logicamente, questo esercizio ha le sue limitazioni e aggiunge non poche sorgenti d'incertezza. Se le analisi si basano su dati osservati, la finestra temporale dei dati diventa critica ad esempio per la selezione del modello probabilistico più adeguato, per l'identificazione di possibili *trend* nei dati, oppure per i valori d'intensità estrema che si possono estrapolare (e.g., la valutazione di eventi a maggior periodo di ritorno sarebbe inapplicabile oppure con scarsa confidenza). Questo fatto, oltre all'interesse per la proiezione di eventi estremi sotto l'ipotesi di cambiamento climatico, ha fornito una delle motivazioni per lo sviluppo di tecniche di regionalizzazione o di *downscaling* [14]. Queste tecniche possono produrre dati per analisi a scala regionale e locale, e quindi teoricamente, molto più importanti per l'analisi di eventi estremi. Tuttavia, i dati generati usando queste tecniche sono limitati enormemente dall'affidabilità dell'informazione proveniente dai modelli climatici a grande scala [7].

Inceteezze: quantificare quello che è quantificabile

In qualsiasi delle sue interpretazioni, il cambiamento climatico è un fenomeno nel quale le incertezze abbondano a ogni elemento ma che non sempre sono evidenziate, e spesso sono trascurate sia nella descrizione delle proiezioni del clima, sia nell'analisi dei dati che ne derivano. Nel nostro particolare interesse, questo costituisce un problema fondamentale per la valutazione di pericolosità e rischio, sia che facciamo analisi usando dati osservati sia che si usino quelli derivati da modelli climatici.

Se si considera l'ipotesi di cambiamento climatico, il primo dei punti che devono essere presi in considerazione è valutare l'effetto che questo fattore può avere nei dati, per testare la fattibilità o meno di basare le analisi su un'ipotesi di stazionarietà dei processi. Se si analizzano dati osservati, come per qualsiasi studio di questo genere, è importante considerare le limitazioni che impone la lunghezza della finestra temporale dei dati per evitare di fare proiezioni temporali oltre quello che i dati permettono, oppure estrapolare intensità a periodi di ritorno troppo lunghi. D'altra parte, se si hanno a disposizione dati derivati da modelli climatici, è importante avere una idea molto precisa di quello che rappresentano, le ipotesi di base nella loro elaborazione (modello, scenari), e le incertezze che sono state considerate.

Una trattazione quantitativa *rigorosa* delle incertezze associate a una qualsiasi analisi che consideri il cambiamento climatico e le proiezioni derivate dai modelli climatici è praticamente impossibile. Tuttavia, con le necessarie affermazioni sulle caratteristiche dei dati e i rispettivi condizionamenti, una valutazione delle incertezze quantificabili è una pratica più che doverosa, non solo per dare più significato ai risultati ottenuti, ma anche

per chiarire il più possibile le implicazioni delle conclusioni.

Ad esempio, consideriamo il caso seguente preso dall'attuale progetto CLUVA (Climate Change and Urban Vulnerability in Africa) [15]. In CLUVA sono state fatte delle proiezioni del clima fino all'anno 2050 considerando diversi scenari di emissione dell'IPCC [15]. Usando i dati generati dai modelli climatici e applicando la teoria di eventi estremi, sono state derivate curve di probabilità di superamento di diversi valori d'intensità come quella illustrata nella Figura 1. Come si vede nella Figura 1, alcune incertezze sono state quantificate e propagate fino al risultato finale. Ma cosa rappresentano queste incertezze?

Per rispondere a questa domanda, è necessario considerare tutta l'informazione usata per generare il risultato. Quello mostrato nella Figura 1 è stato raggiunto con le seguenti condizioni:

1. i dati climatici sono stati generati considerando un singolo modello (i.e., una parametrizzazione specifica);
2. è stato considerato un singolo scenario di emissione: il RCP4.5 [15] (nota: anche se in CLUVA sono considerati diversi scenari, qui volutamente ne usiamo solo uno per la discussione);
3. non sono stati usati ensambles di modelli né di soluzioni perturbando i parametri (nota: ensambles intra-

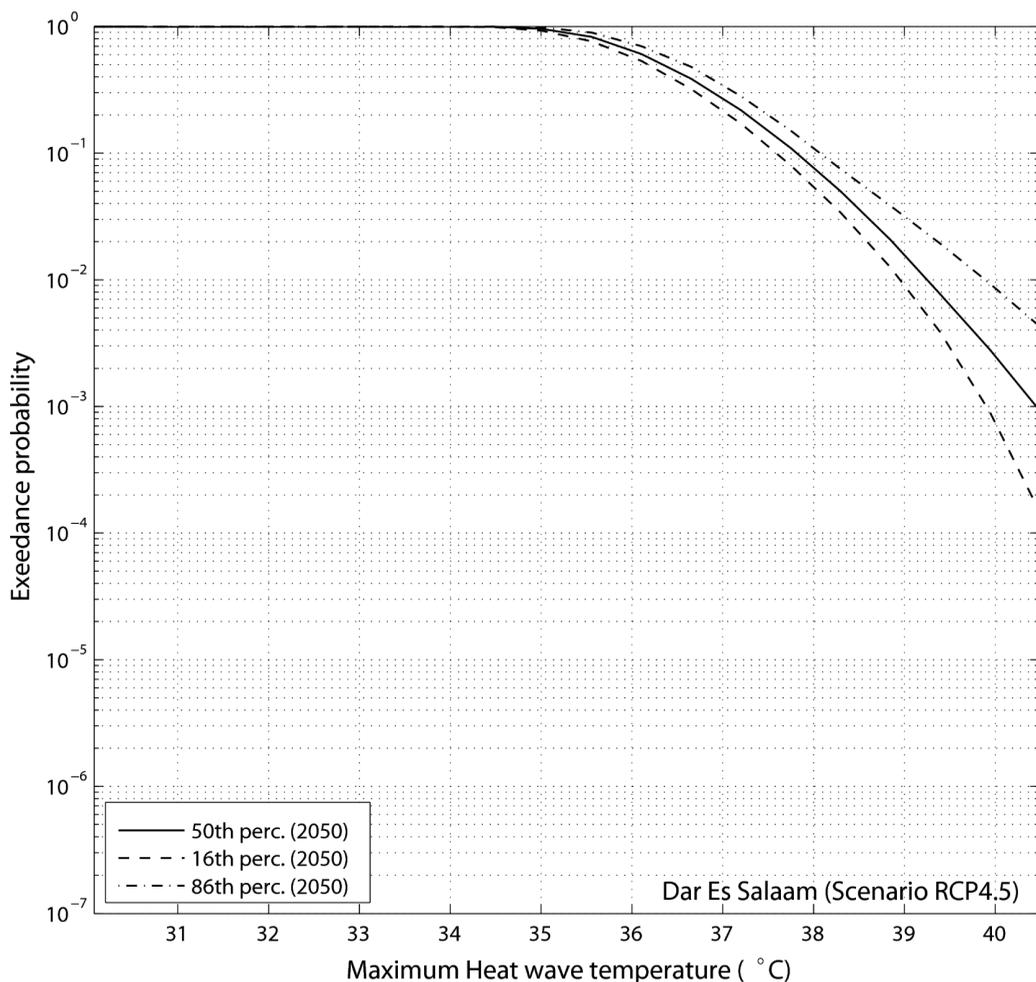


Figura 1. Curva di probabilità di superare un certo valore di temperatura massima in un'onda di calore di durata superiore a 3 giorni, in Dar Es Salaam (Tanzania), derivata da dati prodotti da un modello regionale e considerando lo scenario RCP 4.5 del IPCC (e.g. [4, 7]). Dati del progetto CLUVA [15].

- modello sono stati fatti in CLUVA, ma non riguardano il caso specifico qui illustrato);
4. sono stati estratti dei valori massimi annuali nei parametri e fatta inferenza sui parametri del modello statistico che spiegava in modo migliore i dati;
 5. è stato valutato l'effetto che le incertezze sui parametri del modello statistico hanno nella stima finale di probabilità di superamento di una certa soglia.

Con questa informazione è possibile dare una risposta più accurata alla domanda posta in precedenza. In pratica, le incertezze che si vedono in Figura 1 si devono esclusivamente alle incertezze derivate dalla stima dei parametri del modello statistico usato per descrivere i dati (EVT).

Con questa premessa, la domanda successiva a cui si deve rispondere è dunque: Che cosa rappresentano le probabilità (di eccedenza) riportate in Figura 1? Considerando le condizioni elencate in precedenza, sappiamo che i risultati ottenuti sono condizionati da una serie di decisioni prese:

1. che il modello (**M**) e la parametrizzazione scelta siano perfetti;
2. che lo scenario di emissione considerato (**Sc**) sia quello che effettivamente descriva quello che accadrà (queste due ipotesi significano in pratica che assumiamo che i dati siano perfetti);
3. che il modello probabilistico usato per descrivere i dati (i.e., **EV**) è quello adeguato.

Allora, cosa sono le probabilità di eccedenza così calcolate? Questo lo possiamo scrivere in termini generici, per un'intensità qualsiasi (**IM**), come:

$$P(\mathbf{IM} \geq \mathbf{IMt} \mid \mathbf{M} = \text{"vero"}; \mathbf{Sc} = \text{"vero"}; \mathbf{EV} = \text{"vero"})$$

dove **IMt** si riferisce a una certa soglia di intensità, ed il simbolo **|** significa "condizionato a". In pratica, in questo esempio si può vedere come il risultato probabilistico ottenuto ha un senso ed è più chiaramente indicato rendendo comprensibili tutti i condizionamenti impliciti nel risultato (che per un osservatore esterno possono non essere chiari). Lo stesso discorso è valido per le incertezze quantificate, visto che così è possibile capire i principali elementi d'incertezza che sono stati propagati nel risultato finale.

Se si può dire che sul clima futuro si possono effettuare delle ipotesi affette da incertezza, sarebbe però opportuno quantificare sempre quello che è quantificabile ed evidenziare i condizionamenti e le ipotesi date per certe nelle stime.

Bibliografia

1. IPCC (1996) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J.T., et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 572 pp.
2. IPCC (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J.T., et al. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
3. IPCC (2012) *Climate Change: New Dimensions in Disaster Risk, Exposure, Vulnerability, and Resilience. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M., Midgley P.M. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
4. IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S.,

- Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
5. Nakićenović N., Swart R. (eds.) (2000) *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 599 pp.
 6. Christensen J.H., Christensen O.B. (2007) A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century, *Climatic Change*, 81(S1), 7-30.
 7. IPCC (2012) *Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment*. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Field C.B., Barros V., Stocker T.F., Qin D., Dokken D.J., Ebi K.L., Mastrandrea M.D., Mach K.J., Plattner G.-K., Allen S.K., Tignor M., Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
 8. Randall D.A., Wood R.A., Bony S., Colman R., Fichefet T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R.J., Sumi A., Taylor K.E. (2007) *Climate models and their evaluation*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 589-662.
 9. Knutti R., Abramowitz G., Collins M., Eyring V., Glecker P.J., Hewitson B., Mearns L. (2010) *Good practice guidance paper on assessing and combining multi model climate projections*. In: *Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi-Model Climate Projections*, Stocker T.F., Dahe Q., Plattner G.-K., Tignor M., Midgley P.M. (eds.), IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, pp. 1-13.
 10. Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J., Zhao Z.C. (2007) *Global climate projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, pp. 747-845.
 11. Tebaldi C., Knutti R. (2007) The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365(1857), 2053-2075.
 12. Tebaldi C., Sanso B. (2009) Joint projections of temperature and precipitation change from multiple climate models: a hierarchical Bayesian approach, *Journal of the Royal Statistical Society Series A – Statistics in Society*, 172(1), 83-106.
 13. Coles S. (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 208 pp.
 14. Carter T.R., Jones R.N., Lu X., Bhadwal S., Conde C., Mearns L.O., O'Neill B.C., Rounsevell M.D.A., Zurek M.B. (2007) *New assessment methods and the characterisation of future conditions*. In: *Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry M.L., Canziani O.F., Palutikof J.P., Van Der Linde P.J., Hanson C.E. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 133-171.
 15. CLUVA (2012): *Climate Change and Urban Vulnerability in Africa*, sito web visitato il 21/09/2012: <http://www.cluva.eu>.