

## **Ricostruzione e analisi dei cambiamenti climatici in Italia: dalla ricerca scientifica ai servizi climatici**

### **Climate change reconstruction and analysis in Italy: from the scientific research to the climate services**

#### **Sommario**

L'Italia dispone di uno dei più ricchi patrimoni di osservazioni meteorologiche esistenti al mondo, grazie anche al ruolo di primissimo piano che ha avuto nello sviluppo delle osservazioni meteorologiche.

Questo ricco patrimonio non è di per sé sufficiente per una accurata ricostruzione delle variazioni climatiche, bensì è necessario che le osservazioni meteorologiche effettuate lungo l'arco di più secoli, con strumenti che sono cambiati nel tempo, siano rese direttamente confrontabili tra loro.

Viene qui mostrato il percorso che, attraverso il recupero, l'omogeneizzazione e l'analisi delle più lunghe serie termopluviometriche italiane, ha portato alla comprensione di come il clima del nostro Paese sia cambiato nell'arco degli ultimi due secoli e come i risultati della ricerca scientifica vengano elaborati per rendere l'informazione climatica fruibile ad un'ampia gamma di utenti per la valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici in un ampio spettro di settori, scientifici e non.

#### **Abstract**

Italy has one of the richest meteorological observation archive in the world, thanks to the top role played by our Country in the development of meteorological observations.

This rich heritage is not in itself sufficient for a careful reconstruction of past climatic variability, but it is necessary that the observations realized over the centuries, with instruments and methods that have changed over time, are made directly comparable to each other.

Here we present the path that, through the recovery, homogenization and analysis of the longest Italian thermopluviometric series, has led to the understanding of how the climate of our Country has changed over the last two centuries and how the results of the scientific research are managed to make the climate information accessible to a wide range of users for assessing the impact of climate change in a broad spectrum of scientific, and non-scientific areas.

**Parole chiave:** temperature, precipitazioni, ricostruzioni climatiche, interpolazioni ad alta risoluzione

**Key words:** temperature, precipitation, climate reconstruction, high-resolution interpolation

Michele Brunetti (corresponding author)

Primo Ricercatore Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima – Consiglio Nazionale delle Ricerche

Via P. Gobetti 101, 40129 Bologna (m.brunetti@isac.cnr.it)

Maurizio Maugeri

Professore Associato Confermato Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali – Università degli Studi di  
Milano

Via Celoria 16, 20133 Milano

## **1. Introduzione**

Numerosi lavori pubblicati dalla comunità scientifica negli ultimi decenni hanno evidenziato come la temperatura media del nostro pianeta in prossimità della superficie sia aumentata in modo significativo, fenomeno diventato ancora più evidente a partire dagli anni '90 del secolo scorso tanto che 19 degli ultimi 20 anni (1997-2016) si classificano tra i 20 più caldi mai registrati da quando sono disponibili le osservazioni a livello globale.

Questo riscaldamento non è avvenuto in modo uniforme sull'intero pianeta, bensì si hanno aree in cui il trend è maggiormente evidente, aree per le quali lo è di meno e pochissime zone per le quali si è osservato un trend negativo, come per esempio la parte più settentrionale del Nord Atlantico dove la temperatura della superficie dell'oceano è in diminuzione a causa dell'aumentato apporto di acqua fredda dovuto alla progressiva fusione della calotta Artica. L'area euro-mediterranea, e quindi anche l'Italia nello specifico, sembra essere una delle zone più sensibili al cambiamento climatico tanto che, anche per il futuro, l'incremento di temperatura previsto sembra essere più pronunciato rispetto a molte altre aree del pianeta. Maggiormente eterogeneo è invece il segnale che caratterizza le precipitazioni: alle medie latitudini dell'emisfero settentrionale le precipitazioni sono aumentate a partire dal 1901, per altre latitudini le tendenze, positive o negative, hanno un basso livello di significatività.

Per poter valutare come il clima sia variato nei decenni e nei secoli passati è indispensabile una accurata ricostruzione delle diverse variabili meteorologiche recuperando il maggior numero di serie osservative. Questo è maggiormente vero per le precipitazioni che, data la loro elevata variabilità spaziale (se confrontata, per esempio, con quella che caratterizza le temperature), necessitano di un maggior numero di punti di osservazione.

L'Italia è una delle regioni dove la disponibilità di lunghe osservazioni meteorologiche è maggiore al mondo e questo ha consentito una più approfondita valutazione della variabilità e dei cambiamenti del clima nel corso degli ultimi secoli. Questo è dovuto al fatto che l'Italia ha avuto un ruolo di primissimo piano nello sviluppo delle osservazioni meteorologiche: basti pensare all'invenzione di alcuni dei principali strumenti meteorologici (il termometro di Galileo e il barometro di Torricelli) e alla nascita a Firenze della prima rete sinottica di osservazioni meteorologiche, la Rete del Cimento, istituita il 19 giugno 1657 dal Granduca di Toscana Ferdinando II de' Medici e dal principe Leopoldo de' Medici.

Il ruolo peculiare che l'Italia ha avuto nello sviluppo della meteorologia ha fatto sì che nei secoli passati si sia accumulato negli archivi del nostro Paese un patrimonio di osservazioni di enorme valore (sei stazioni meteorologiche italiane dispongono di osservazioni a partire dal XVIII secolo e una quindicina dalla prima metà del XIX secolo).

Nel corso degli ultimi decenni una parte significativa di questo patrimonio è stata recuperata e resa disponibile alla ricerca scientifica. In questo contesto hanno svolto un ruolo di primo piano il Consiglio Nazionale delle Ricerche (Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima) e l'Università degli Studi di Milano (Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali) che stanno sviluppando da oltre 20 anni un articolato programma di ricerche

mirato a recuperare e a valorizzare le antiche osservazioni meteorologiche italiane. Un quadro di sintesi delle più lunghe serie a risoluzione mensile attualmente disponibili nella banca dati per le temperature e per le precipitazioni è mostrato in figura 1, anche se essa è in continua evoluzione in quanto nuove serie continuano ad affluire per effetto delle attività di ricerca ancora in corso.

## **2. La qualità dei dati**

La disponibilità di un'ampia base di dati meteorologici è condizione necessaria per poter procedere a un'affidabile ricostruzione dell'evoluzione del clima di una data località, tuttavia essa non è di per sé sufficiente: è infatti improbabile che osservazioni meteorologiche effettuate lungo l'arco di più secoli, con strumenti che sono cambiati nel tempo, siano direttamente confrontabili tra loro. Al contrario, esse nascondono al loro interno un segnale di origine non-climatica (legato a tutti i cambiamenti che le osservazioni hanno subito nel tempo, quali la tipologia e la collocazione degli strumenti, le regole di osservazione, ecc.) che maschera quello che è il segnale climatico reale che noi cerchiamo di ricostruire e studiare.

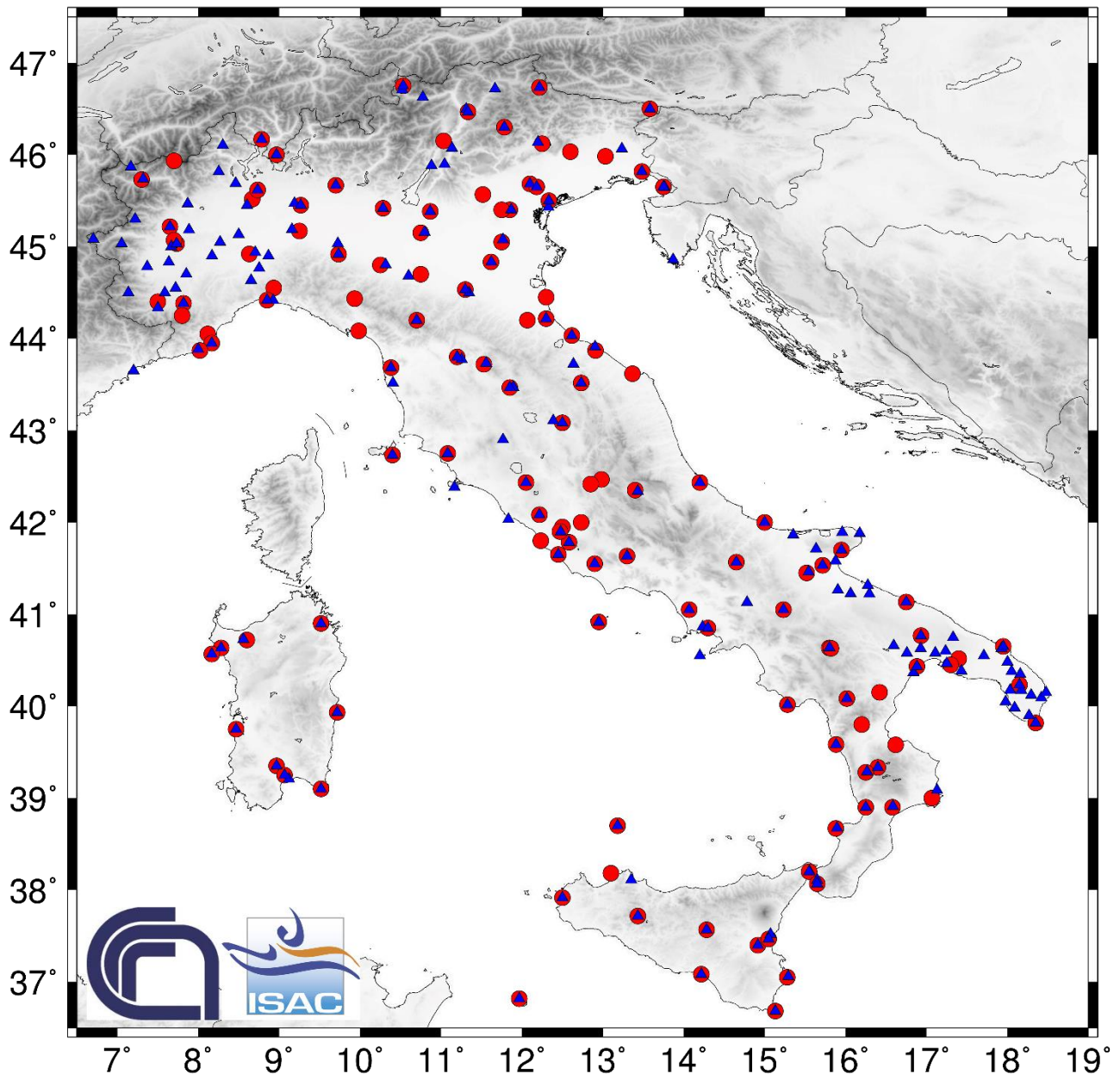


Figura 1. Collocazione delle stazioni termometriche (pallini rossi) e pluviometriche (triangoli blu) che fanno parte della banca dati ISAC-CNR (fonte [www.isac.cnr.it](http://www.isac.cnr.it)).

Negli ultimi 20 anni la comunità scientifica ha preso via via coscienza di questo problema tanto che attualmente non è accettabile un lavoro di recupero e analisi di lunghe serie meteorologiche mirato allo studio della variabilità climatica senza un preventivo esame critico dei dati in termini di qualità e omogeneità per eliminare i segnali che alterano quello che è l'andamento reale della variabile in esame. L'insieme delle procedure attraverso le quali i segnali non-climatici vengono identificati ed eliminati prende il nome di omogeneizzazione. Operativamente, l'omogeneizzazione viene sempre condotta rispetto a un determinato periodo della serie: si cerca di rendere omogenei tutti i valori con quelli di un certo intervallo temporale di riferimento (che solitamente coincide con il più recente in modo da facilitare il successivo aggiornamento dei

dati) correggendoli in maniera tale che appaiano come se fossero sempre stati osservati sotto le condizioni operative esistenti nel periodo di riferimento.

Il tema dell'omogeneizzazione delle serie storiche di dati meteorologici è attualmente oggetto di vivace dibattito nell'ambito della letteratura scientifica internazionale (Venema et al., 2012). Schematizzando, in estrema sintesi, i metodi utilizzati possono essere classificati in diretti e indiretti. I primi si basano su informazioni (i cosiddetti metadati), di solito ricavate da studi di carattere storico, i secondi fanno uso di tecniche statistiche, generalmente basate sul confronto con altre serie storiche. Da un punto di vista concettuale, naturalmente, i metodi diretti sembrano molto più interessanti. Purtroppo però è molto frequente che i metadati siano incompleti e imprecisi e comunque, anche in presenza di una grande quantità di informazioni, accade sovente che sia molto difficile trasformare notizie di carattere storico in dati quantitativi, e quindi generalmente è molto difficile che una serie storica possa essere omogeneizzata completamente senza utilizzare i metodi indiretti.

Per omogeneizzare una serie di dati meteorologici  $X(t)$  con i metodi indiretti di omogeneizzazione possiamo considerarla come somma di più termini e scrivere:

$$X(t) = C(t) + IH(t) + e(t) \quad (1)$$

dove  $C(t)$  è la funzione di tendenza di un ipotetico segnale climatico,  $IH(t)$  è l'eventuale disomogeneità presente nel valore  $t$ -esimo della serie ed  $e(t)$  rappresenta un residuo casuale. Utilizzando termini analoghi, la serie di riferimento ( $R(t)$ ) si rappresenta nella seguente forma:

$$R(t) = C'(t) + IH'(t) + e'(t) \quad (2)$$

Se le due serie appartengono alla stessa regione climatica, possiamo assumere che  $C(t) = C'(t)$  per ogni valore di  $t$ . Inoltre, se la serie di riferimento è supposta essere già omogenea, risulterà sempre  $IH'(t) = 0$ .

Perciò, se costruiamo la serie delle differenze, abbiamo:

$$Z(t) = X(t) - R(t) = IH(t) + d(t) \quad (3)$$

con

$$d(t) = e(t) - e'(t)$$

Quindi la serie delle differenze ( $Z(t)$ ) esprime le disomogeneità della serie candidata ( $IH(t)$ ), rispetto alla serie di riferimento, più un termine casuale di errore ( $d(t)$ ).

Appare chiaro che l'efficacia di questo metodo risiede fondamentalmente nella capacità di isolare le discontinuità della stazione studiata dalle variazioni climatiche regionali. Difatti, le stazioni vicine sono utilizzate proprio come indicatori del clima della regione circostante. In sostanza, si accetta ragionevolmente come mutamento climatico una variazione che trovi riscontro nelle stazioni vicine, mentre un cambiamento che compaia solo nella stazione in esame viene considerato di natura non climatica. Questa considerazione di fondo mostra le potenzialità, ma sottolinea anche i limiti dei metodi indiretti di omogeneizzazione,

evidenziando come essi siano basati sul fatto che i segnali climatici manifestino gradienti spaziali così deboli da poter assumere uguale il segnale climatico della serie in esame a quello della corrispondente serie di riferimento.

L'inconveniente principale delle serie di riferimento è che i dati considerati come riferimento potrebbero a loro volta non essere omogenei. Ciò significa avere il termine  $IH'(t)$  nell'equazione (2) diverso da zero. Per evitare questo rischio, si assume preliminarmente che le serie di riferimento siano sempre potenzialmente disomogenee. Si suddivide poi l'intervallo di esistenza della serie da omogeneizzare in più sotto-periodi. Per ognuno di questi sotto-periodi, si individuano serie di riferimento diverse, selezionate tra un gruppo più ampio di possibili serie di riferimento, in modo che esse non presentino disomogeneità in quel periodo. Infine, si procede al confronto con la serie da omogeneizzare. Un ulteriore problema consiste nel fatto che talora tutte le serie di una certa area possono presentare contemporaneamente la stessa disomogeneità. Ciò accade, ad esempio, quando norme nazionali comportano cambiamenti che vengono adottati simultaneamente da tutte le stazioni. In questo caso è molto utile la presenza nel data set di serie provenienti da network diversi e gestiti da autorità diverse.

Una volta risolto il problema di costruire una valida serie di riferimento, la valutazione dell'omogeneità della serie considerata viene effettuata mediante vari test statistici. Per le serie termometriche e pluviometriche italiane, in particolare, si è fatto uso del test di Craddock (Craddock, 1979; Brunetti et al., 2006).

Esso accumula le differenze normalizzate tra la serie "candidata" e la serie di riferimento una volta che la seconda è stata portata, attraverso un termine additivo (per le temperature) o un fattore moltiplicativo (per le precipitazioni) costante, alla stessa media di lungo periodo della prima. Nel caso ideale di una serie omogenea, tracciando il grafico di queste differenze cumulate in funzione degli anni, si dovrebbe ottenere una linea orizzontale. Tuttavia, le diversità dei regimi climatici tra la serie "candidata" e quella di riferimento introducono un "rumore climatico" che causa leggere deviazioni (mai discontinuità, se la serie è omogenea) da questa linea teorica. Se, invece, la curva si discosta molto dallo zero e in un punto si registra una discontinuità nella derivata prima della curva, in quel punto è probabile che vi sia una discontinuità della serie "candidata". Una volta individuata una discontinuità nella curva Craddock resta però l'ambiguità dell'assegnazione di tale disomogeneità ad una delle due serie: infatti una sovrastima della serie "candidata" nel primo periodo produce il medesimo segnale di una sottostima della serie di riferimento nel medesimo periodo. Confrontare ogni serie con più serie di riferimento, per esempio altre 10 serie appartenenti a stazioni limitrofe, permette di ottenere un fascio di curve Craddock che risolve l'ambiguità sopra descritta: se infatti tutte le 10 curve mostrano lo stesso segnale di disomogeneità possiamo assegnare il problema alla serie "candidata", se invece una sola delle serie di riferimento mostra un segnale nel test di Craddock, allora è quella serie che probabilmente ha un problema.

Una volta individuata una disomogeneità, si stimano quindi le correzioni che si dovrebbero effettuare affinché la serie non omogenea si comporti in modo coerente con le stazioni circostanti e si valuta se applicare o meno

queste correzioni, tenendo anche conto delle informazioni sulla storia delle osservazioni che si hanno a disposizione.

L'omogeneizzazione delle serie termometriche e pluviometriche secolari italiane ha evidenziato molte disomogeneità, spesso corroborate da informazioni storiche relative a interventi o spostamenti effettuati. Se consideriamo in particolare il data-base delle serie termometriche, è stata individuata e corretta mediamente in ogni serie una disomogeneità ogni 10-20 anni. L'aspetto più interessante, tuttavia, non consiste tanto nel numero di disomogeneità, quanto nel fatto che esse danno luogo ad un errore sistematico che aggiunge un segnale di lungo periodo di tipo non-climatico alle serie in esame. Analizzando la serie delle correzioni medie applicate all'intero data-set (che si ottiene calcolando la media delle differenze tra le serie omogeneizzate e quelle originali delle varie stazioni) si osserva un trend di circa 0.5 °C sugli ultimi 140 anni. Questo dato evidenzia un errore sistematico importante rispetto al segnale climatico che si vuole studiare (si tenga presente che il trend della temperatura media globale sull'ultimo secolo è di circa 0.9 °C/secolo) e questo conferma l'importanza dell'omogeneizzazione dei dati. È peraltro opportuno sottolineare come errori sistematici di questo tipo non siano una caratteristica dei soli dati italiani.

Va quindi sottolineato come sia assolutamente falsa l'affermazione secondo la quale mediando tra molte serie temporali gli errori presenti in esse si compensano, al contrario, la somma di tutti gli errori aggiunge alla serie media un segnale di lungo termine (ovvero un trend) che è importante rispetto al segnale climatico che si vuole studiare. La causa di questo errore sistematico va ricercata nel progressivo miglioramento dei siti di misura (il lato nord degli edifici piuttosto che il lato sud; gli Stevenson screen collocati nel giardino piuttosto che le finestre meteorologiche alle quali si accedeva dall'interno degli edifici e che, quindi, risentivano del calore dei locali adiacenti), nell'introduzione di più efficaci tecniche di schermatura dei termometri dalla radiazione solare diretta e riflessa (schermature in legno dipinto di bianco piuttosto che schermature in metallo) e, spesso, il trasferimento delle stazioni di misura dai centri cittadini alle zone rurali meno soggette all'effetto dell'isola di calore; tutti questi progressivi miglioramenti hanno fatto sì che attualmente si abbiano misure più basse rispetto a quelle che si avrebbero nelle stesse condizioni climatiche con i siti e le schermature più vecchie.

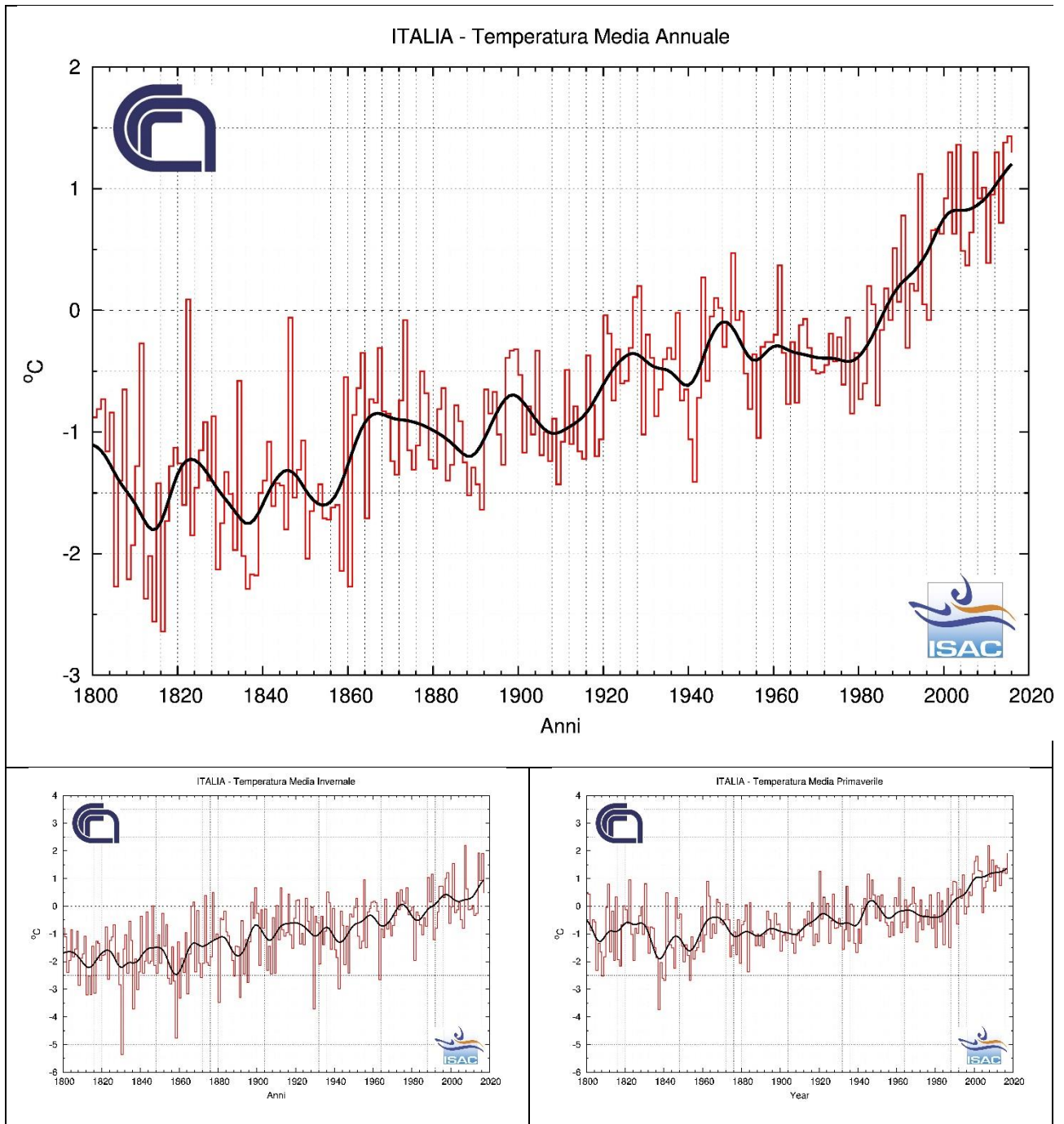
### **3. Temperature**

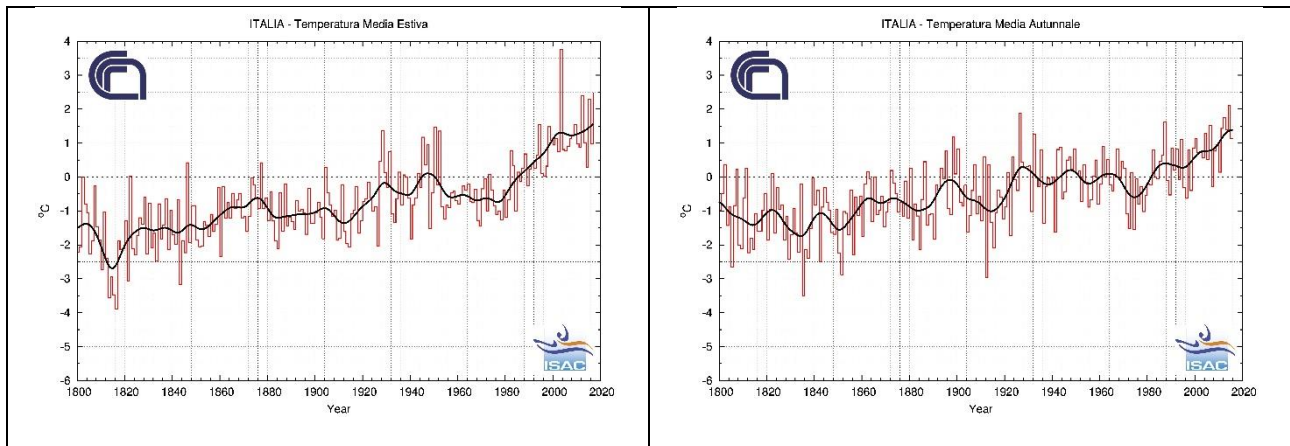
L'andamento della temperatura in Italia negli ultimi due secoli è stato analizzato approfonditamente da Brunetti et al. (2006). I risultati presentati in questo lavoro vengono aggiornati mensilmente in rete sul sito dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima ([http://www.isac.cnr.it/climstor/climate\\_news.html](http://www.isac.cnr.it/climstor/climate_news.html)) in una versione recentemente ri-omogeneizzata.

Come già detto, l'andamento della temperatura nel lungo periodo presenta una debole variabilità spaziale, pertanto gli elementi salienti possono essere ben descritti da un'unica serie rappresentativa delle variazioni medie su tutta l'Italia. Osservando questa serie (Figura 2) è possibile notare che i valori si mantengono piuttosto bassi fino a prima del 1860, con il 1816 identificabile come l'anno più freddo dell'intero periodo. Successivamente si nota una tendenza graduale verso temperature via via più elevate il cui contributo maggiore proviene dagli anni '60 e '90 del XIX secolo e dagli anni '20 e '40 del XX secolo. Dopo un primo massimo



relativo raggiunto intorno alla metà del XX secolo (il più rilevante dell'intera serie, eccettuati gli ultimi due decenni) si osserva un comportamento piuttosto stabile fino agli anni '70, seguito da un nuovo periodo di forte crescita che culmina nell'ultimo ventennio, il più caldo dell'intera serie.





**Figura 2.** Evoluzione della temperatura media annuale per l'Italia per il periodo 1800–2017 (anno e autunno aggiornati al 2016; inverno, primavera ed estate aggiornate al 2017). I dati sono espressi in termini di anomalie rispetto al periodo 1971-2000 (trentennio più recente disponibile per l'intero data set poiché alcune serie secolari si interrompono nei primi anni 2000). Per una più efficace visualizzazione degli andamenti a lungo termine, viene anche mostrata la serie che si ottiene filtrando i dati mediante un filtro gaussiano passa basso. (fonte: ISAC-CNR: [http://www.isac.cnr.it/climstor/climate\\_news.html](http://www.isac.cnr.it/climstor/climate_news.html)).

Il trend stimato sull'intero periodo a partire dal 1800 è pari a  $0.105 \pm 0.006^\circ\text{C}/\text{decennio}$  con poche variazioni tra nord e sud.

Confrontando il trend sull'intero periodo con quello calcolato limitatamente al periodo via via più recente si nota un progressivo aumento della pendenza del trend: il rate di crescita della temperatura a partire dal 1981 è infatti quasi quattro volte più forte di quello calcolato a partire dal 1800.

Questo è in accordo con quanto accaduto a livello globale anche se il rate di crescita in Italia è significativamente più alto rispetto a quello globale.

L'anno più caldo della serie è risultato essere il 2015 con un'anomalia di  $+1.43^\circ\text{C}$  rispetto alla media del periodo 1971-2000, quello più freddo il 1816 con un'anomalia di  $-2.64^\circ\text{C}$ . La differenza tra l'anno più caldo e l'anno più freddo risulta quindi di circa  $4^\circ\text{C}$ .

Un'analisi su base stagionale delle variazioni della temperatura media mostra che, considerando un orizzonte secolare, non ci sono differenze molto significative tra le diverse stagioni. Se però ci si concentra sugli ultimi decenni, il riscaldamento risulta essere maggiore in primavera e in estate, minore in autunno e in inverno.

**Tabella 1.** Trend delle temperature medie annuali e stagionali per l'Italia stimate sull'intero periodo della serie e su diversi sotto-periodi via via più recenti. Tutti i valori riportati in grassetto sono significativi con un livello di significatività  $p < 0.01$ , i valori in corsivo sono significativi con un livello di significatività  $p < 0.05$  (significatività stimata con il test non-parametrico di Mann-Kendall).

PERIODO	TREND TEMPERATURA MEDIA ITALIANA				
	[°C/DECENNIO]				
	ANNO	INVERNO	PRIMAVERA	ESTATE	AUTUNNO
1800-2016	0.105±0.006	0.11±0.01	0.084±0.009	0.124±0.009	0.099±0.009
1901-2016	0.157±0.012	0.14±0.03	0.16±0.02	0.19±0.02	0.13±0.02
1951-2016	0.27±0.03	0.20±0.05	0.29±0.04	0.38±0.05	0.23±0.04
1981-2016	0.43±0.06	0.4±0.1	0.5±0.1	0.5±0.1	0.3±0.1

Il forte aumento di temperatura che si è registrato in Italia nel corso degli ultimi decenni ha prodotto anche una maggior incidenza di periodi estremamente caldi, portando ad un forte incremento della frequenza con cui si registrano le ondate di calore estive. Questo incremento tuttavia non risulta dovuto ad una maggiore variabilità delle temperature attorno al loro valor medio, ma è una semplice conseguenza del fatto che tali oscillazioni ora avvengono attorno ad un valor medio più elevato e ciò rende molto più probabile il raggiungimento di valori di temperatura che producono forte disagio al nostro organismo. Per maggiori dettagli su questo aspetto si rimanda a Simolo et al. (2010).

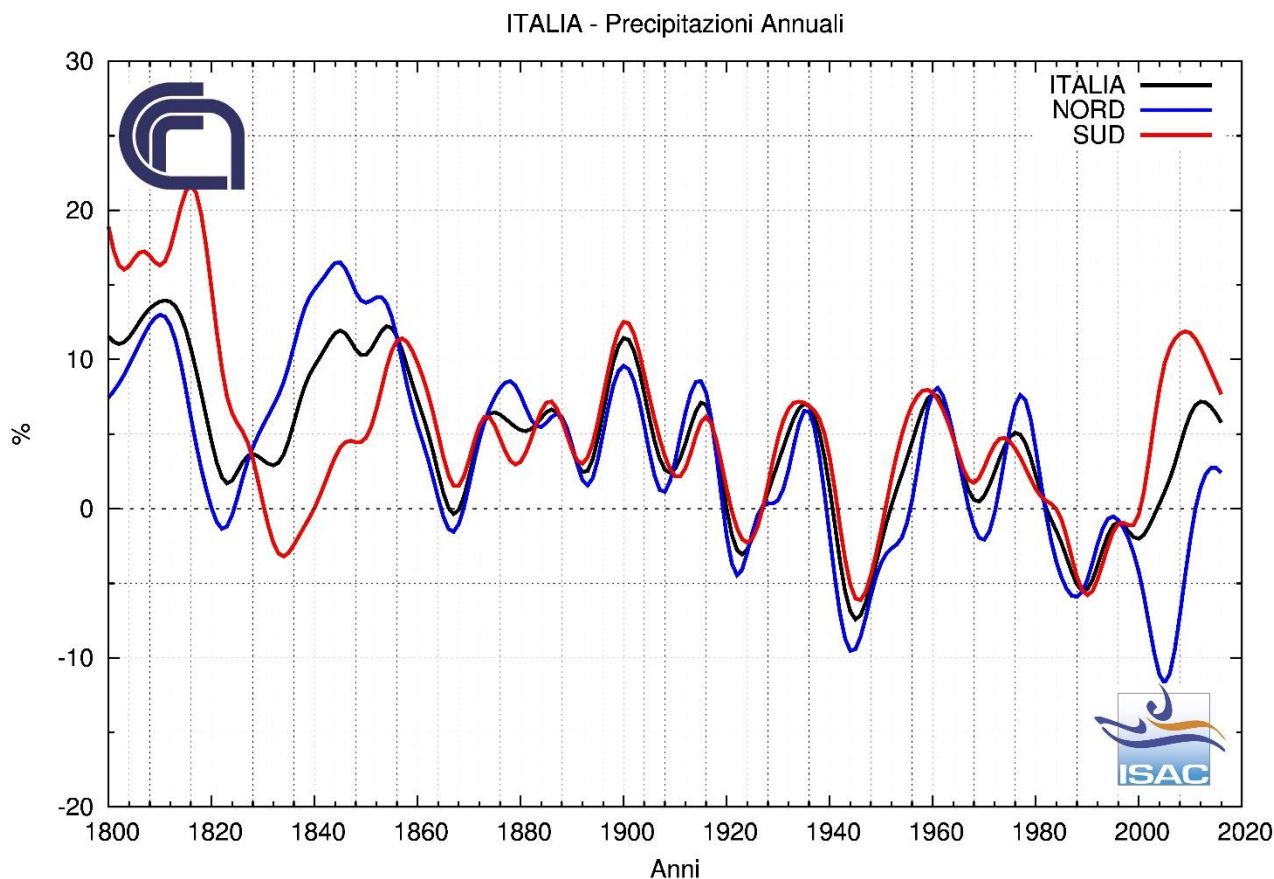
#### 4. Precipitazioni

Nonostante rilevanti peculiarità regionali nella variabilità ad alta frequenza nelle diverse aree geografiche, anche per le precipitazioni si osserva una certa uniformità nell'andamento a lungo termine (Brunetti et al., 2006). Anche per questa variabile è quindi possibile individuare gli andamenti più significativi mediante l'analisi di serie medie macro-regionali o anche di una sola serie media nazionale. In questo caso, tuttavia, è importante sottolineare come con tale approccio si catturi solo in parte ciò che accade nelle singole regioni.

La figura 3 mostra l'andamento delle anomalie (relative alla media del periodo 1971-2000) delle precipitazioni annuali per l'intero territorio italiano ottenuto da una versione aggiornata del database presentato in Brunetti et al. (2006), oltre a due serie rappresentative della parte settentrionale e di quella meridionale (separate dal 43-esimo parallelo) del nostro Paese (le serie sono filtrate con un filtro passa basso che consente di mettere in evidenza le variazioni a scala temporale almeno decennale). Essa mostra come la serie di precipitazioni annuali per l'intera Italia presenti una sequenza di massimi e minimi relativi, sovrapposta ad una tendenza di lungo periodo verso una graduale diminuzione. I valori più alti si sono raggiunti attorno al 1810, tra gli anni '40 e gli anni '50 del XIX secolo, intorno al 1900, al 1960 ed al 1980. I periodi più secchi si sono riscontrati intorno al 1990 e negli anni '20 e '40 del XX secolo, mentre altri minimi relativi, di minore entità, si sono avuti tra gli anni '20 e gli anni '30 del XIX secolo ed intorno al 1860. È interessante notare il comportamento opposto tra nord e sud nell'ultimo decennio, con un protrarsi della tendenza negativa al nord e un'inversione verso un aumento delle precipitazioni al sud.

A livello stagionale, pur accanto ad alcune analogie, sia nel comportamento a lungo termine sia nella variabilità ad alta frequenza, esistono molte differenze, soprattutto nella collocazione dei periodi contraddistinti dai

minimi e massimi. Va comunque sottolineato che anche a livello stagionale esiste una buona uniformità di segnale nelle due regioni su scale temporali secolari anche se l'intensità del segnale è diversa.



**Figura 3.** Evoluzione delle precipitazioni totali annuali per l'Italia e per le due sotto-aree Nord e Sud (separate dal 43-esimo parallelo) per il periodo 1800–2016. I dati sono espressi in termini di anomalie percentuali rispetto al periodo 1971-2000 (trentennio più recente disponibile per l'intero data set poiché alcune serie secolari si interrompono nei primi anni 2000). Per una più efficace visualizzazione degli andamenti a lungo termine, vengono mostrate le serie che si ottengono filtrando i dati mediante un filtro gaussiano passa basso. (fonte: ISAC-CNR: [http://www.isac.cnr.it/climstor/climate\\_news.html](http://www.isac.cnr.it/climstor/climate_news.html))

La tendenza sull'intero periodo di disponibilità dati (1800-2016) è leggermente negativa, con un trend pari a  $-0.47 \pm 0.15\%$ /decennio, maggiormente pronunciato al nord dove il trend è di  $-0.64 \pm 0.18\%$ /decennio. Considerando il periodo via via più recente il trend negativo diventa maggiormente pronunciato (anche se la significatività del segnale cala) sia al nord che al sud. Fa eccezione il periodo più recente per il quale, come già accennato, nord e sud hanno tendenze opposte: un protrarsi della tendenza negativa al nord e un'inversione verso un aumento delle precipitazioni al sud.

A livello stagionale tra gli aspetti più interessanti si nota la più forte diminuzione invernale e primaverile per l'Italia meridionale (con una diminuzione del 22% e del 12% dal 1800 ad oggi) con un'inversione di tendenza negli ultimi decenni, mentre per l'Italia settentrionale le stagioni con il segnale negativo più forte sono l'estate e l'autunno (-19% e -25% dal 1800 ad oggi rispettivamente).

PERIODO	TREND PRECIPITAZIONE ANNUALE [%/DECENNIO]		
	ITALIA	NORD	SUD
<b>1800-2016</b>	<b>-0.47±0.15</b>	<b>-0.64±0.18</b>	<i>-0.41±0.17</i>
<b>1901-2016</b>	-	-0.6±0.4	+
<b>1951-2016</b>	-	-	-
<b>1981-2016</b>	+0.38±0.19	+	+5.5±2.6

**Tabella 2.** Trend della precipitazione totale annuale per l'Italia, il nord e il sud, su diversi periodi. I valori sono espressi in percentuale per decennio; il livello di significatività è grassetto  $p < 0.01$ ; corsivo  $p < 0.05$ ; normale  $p < 0.1$ ; per i trend non significativi è indicato solo il segno.

Anche per le precipitazioni si sono ricercate tendenze temporali nella frequenza e nell'intensità degli eventi estremi giornalieri, in particolare per gli ultimi 50-100 anni. I risultati non mostrano tendenze particolari: ci sono aree del nostro Paese in cui alcune finestre temporali mostrano trend anche significativi, ma che diventano non significativi, o addirittura di segno opposto, se si considerano altre finestre temporali (si veda, per esempio, Brunetti et al., 2012 e Brugnara et al., 2012).

## 5. Considerazioni finali: dalla ricerca scientifica sui cambiamenti climatici ai Servizi Climatici

A fronte degli importanti risultati già ottenuti nel contesto della ricostruzione del clima del nostro Paese, va comunque sottolineato come non sia ancora stato sfruttato appieno il grande patrimonio di dati di cui disponiamo. Oltre alle serie riportate in figura 1 sono presenti nella banca dati numerose altre serie (dell'ordine delle centinaia) con dati a partire dagli anni '20 del XX secolo (principalmente provenienti dall'ex Servizio Idrografico, dall'Aeronautica Militare o da organizzazioni non istituzionali come, per esempio, la Società Meteorologica Italiana). Tuttavia la loro disponibilità non è distribuita in modo uniforme su tutta la penisola, essendo legata a lavori di digitalizzazione eseguiti a livello locale o regionale.

Una comprensione ancora più profonda di come è variato il clima nel passato non può prescindere da un più esaustivo recupero delle osservazioni che sono state diligentemente effettuate e annotate nei secoli da generazioni di osservatori.

A parte la ricerca scientifica sui cambiamenti climatici, una più dettagliata ricostruzione del clima del passato è uno strumento fondamentale anche per una valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici sulle risorse

naturali, sulle infrastrutture e sulla società in genere. La conoscenza del clima e delle sue variazioni alla scala locale è infatti fondamentale per innumerevoli aspetti della nostra società, per esempio per conoscere il fabbisogno energetico di una particolare località, per una scelta ponderata delle colture e delle varietà maggiormente adatte alle condizioni locali o per quantificare l'effetto di tali cambiamenti climatici sugli ecosistemi, solo per citare alcuni esempi.

I risultati della ricerca scientifica appena presentati, seppure estremamente importanti, non sempre costituiscono uno strumento utile alla valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici su scala locale, obiettivo perseguibile solo con una ben più elevata disponibilità di osservazioni meteorologiche passate. Tuttavia, anche avendo a disposizione tutte le osservazioni passate esistenti per il nostro Paese, è molto difficile che una stazione meteorologica sia disponibile per ciascuno dei siti per i quali vogliamo costruire l'informazione climatica. Si presenta quindi la necessità di proiettare l'informazione della variabilità climatica fornita dalle osservazioni su un numero di punti che risulta essere alcuni ordini di grandezza superiore del numero di stazioni disponibili, ed è altrettanto importante che questa informazione non sia data solo in termini di anomalie rispetto a un valore medio, ma sia espressa in termini di valori assoluti.

Tale obiettivo è perseguibile descrivendo la struttura spazio-temporale della variabile meteorologica su una data area come la sovrapposizione di due campi: i valori climatologici normali su un dato periodo di riferimento (per esempio il 1961-1990) e le deviazioni da questi, ovvero le anomalie.

Le due componenti possono essere ricostruite in modo totalmente indipendente l'uno dall'altro, basati su dataset completamente distinti e utilizzando tecniche di interpolazione diverse

La proiezione delle anomalie su una griglia ad alta risoluzione può essere effettuata utilizzando tecniche statistiche molto semplici grazie alla elevata coerenza spaziale delle fluttuazioni temporali delle variabili meteorologiche, legate alla variabilità del clima. A tale scopo sarà sufficiente un numero di stazioni con densità spaziale relativamente bassa, ma sarà indispensabile che esse dispongano di osservazioni per un lungo intervallo temporale e che tali serie temporali siano molto curate in termini di qualità dei dati ed omogeneità, in modo da essere rappresentative della sola variabilità climatica e non degli spostamenti e dei cambiamenti che le stazioni e gli strumenti hanno subito nel tempo.

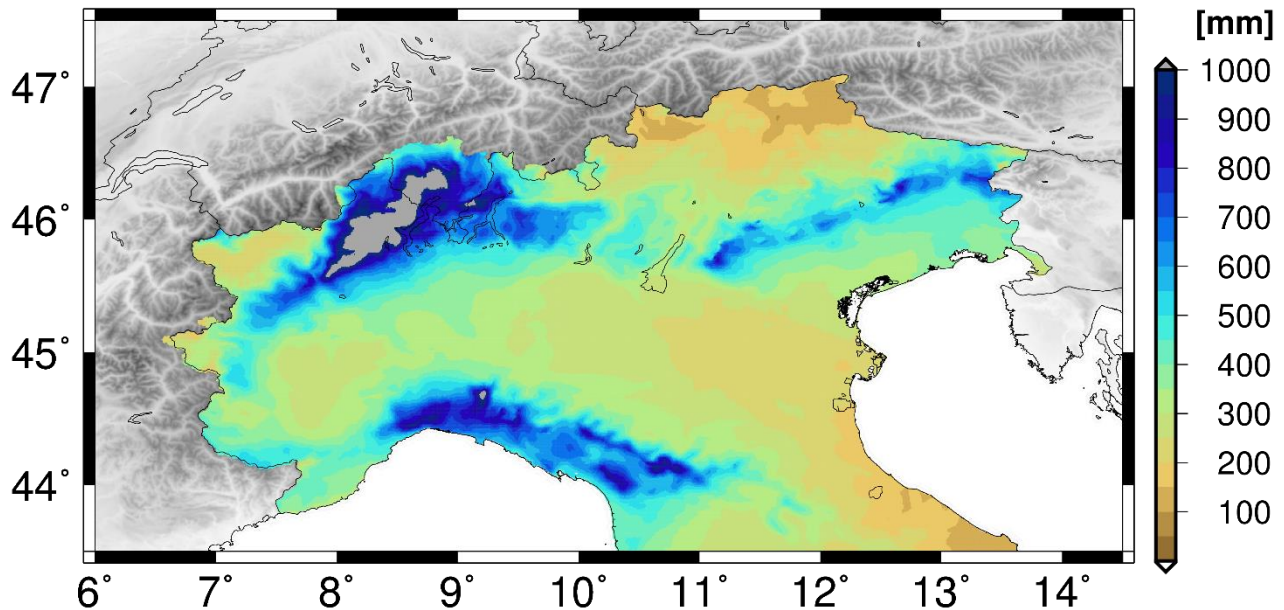
Al contrario, le climatologie sono legate alle caratteristiche geografiche del territorio: questo provoca forti gradienti spaziali e, di conseguenza, implica la necessità di moltissime stazioni (è però sufficiente un intervallo temporale abbastanza limitato) e l'uso di modelli di interpolazione abbastanza sofisticati.

La successiva sovrapposizione dei due campi (climatologie e anomalie) permette di ricostruire una serie temporale sintetica di una variabile meteorologica per ogni punto di un dato dominio, anche se una stazione meteorologica non è disponibile per quel luogo preciso. È così possibile disporre di informazioni climatiche ad alta risoluzione, utili per una gran quantità di applicazioni e di servizi.

Anche in Italia si sta lavorando in tale direzione. Brunetti et al. (2014) e Crespi et al. (2017) hanno recentemente pubblicato le climatologie 1961-1990 (periodo con la massima disponibilità di dati per l'Italia) ad alta

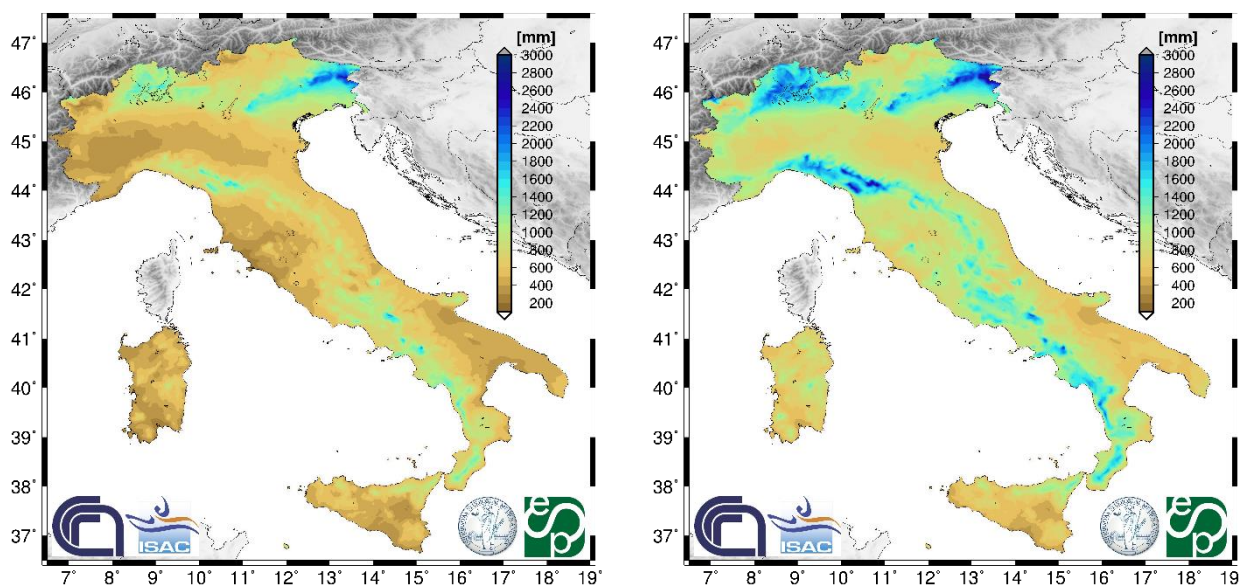
risoluzione (30 secondi d'arco) di temperature e precipitazioni, rispettivamente, per l'intero territorio italiano. Interpolando sui medesimi nodi di griglia le anomalie ottenute un data-set di lunghe serie omogeneizzate come, per esempio, quello precedentemente discusso è possibile ottenere per ogni punto una serie temporale di temperature e precipitazioni mensili in valori assoluti per i secoli passati.

A titolo di esempio mostriamo in figura 4 le precipitazioni totali per l'ottobre del 1872 in cui avvenne l'alluvione del Po.



**Figura 4.** Precipitazioni cumulate del mese di ottobre del 1872 per il nord Italia. La ricostruzione è stata estesa al di fuori dei confini italiani per comprendere l'intera area di raccolta del bacino del Po.

Un ulteriore esempio relativo ad un anno eccezionalmente siccitoso è mostrato in figura 5 che mette a confronto le precipitazioni medie sul trentennio 1961-1990 con quelle del 2017, risultato essere l'anno più secco dal 1800 ad oggi per l'Italia (fonte [www.isac.cnr.it/climstor/climate\\_news.html](http://www.isac.cnr.it/climstor/climate_news.html)). La figura mette in evidenza come le aree maggiormente interessate da questo evento siano la Sardegna, l'Italia Nord-Occidentale e il versante Tirrenico dell'Italia Centrale.



**Figura 5.** Confronto delle precipitazioni registrate nell'anno meteorologico 2017 (pannello di sinistra) con la precipitazione climatologica media annuale riferita al trentennio 1961-1990 (adattata da Crespi et al. (2017) (pannello di destra)).

Un esempio di applicazione di questi data-set in ambito idrologico è presentato in questo stesso volume in Ranzi et al., (2017) dove sono state ricostruite le precipitazioni mensili ad alta risoluzione per il bacino idrologico dell'Adda (con chiusura a Lecco) dal 1845 ad oggi; l'integrale delle precipitazioni sull'intera area del bacino sono state messe a confronto con le misure dei deflussi.

Prodotti operativi come quelli sopra descritti fanno parte delle attività dei cosiddetti Servizi Climatici che, in analogia ai Servizi Meteorologici, hanno il compito di fornire l'informazione climatica (passata e futura) utile all'utente finale. Si stanno infatti sviluppando a livello europeo e internazionale iniziative di tipo Climate Service, ovvero istituzioni preposte alla costruzione e alla disseminazione dell'informazione climatica, costruita e presentata in una forma tale da essere immediatamente fruibile dagli utenti finali, siano essi decisori politico, privati o enti di ricerca, ovvero indipendentemente dalle loro competenze scientifiche nel settore.

## Bibliografia

Brugnara, Y., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Simolo, C., 2012. High-resolution analysis of daily precipitation trends in the central Alps over the last century. *International Journal of Climatology*, 32, 1406-1422.

Brunetti M., M. Maugeri, F. Monti, T. Nanni, 2006. Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenized instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 26, 345-381.



- Brunetti M., T. Caloiero, R. Coscarelli, G. Gullà, T. Nanni, C. Simolo, 2012. Precipitation variability and change in the Calabria region (Italy) from a high resolution daily dataset. *International Journal of Climatology*, 32, 57-73.
- Brunetti M., M. Maugeri, T. Nanni, C. Simolo, J. Spinoni, 2014. High-resolution temperature climatology for Italy. interpolation method intercomparison. *International Journal of Climatology*, 34, 1278-1296.
- Craddock JM. 1979. Methods of comparing annual rainfall records for climatic purposes. *Weather* 34: 332–346.
- Crespi A., M. Brunetti, G. Lentini, M. Maugeri, 2017. 1961-1990 high-resolution monthly precipitation climatologies for Italy. *International Journal of Climatology*, in press, doi: 10.1002/joc.5217.
- Ranzi R., Tomirotti M., Castioni C., Brunetti M., Crespi A., Maugeri M. 2018. Analisi delle tendenze di lungo termine nel regime degli afflussi meteorici e dei deflussi dell'adda a lecco (1845-2014). *L'Acqua*, XX, YY-ZZ.
- Simolo, C., Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Speranza, A., 2010. Understanding climate change-induced variations in daily temperature distributions over Italy. *Journal of Geophysical Research*, 115, D22110.
- Venema V. K. C., O. Mestre, E. Aguilar, I. Auer, J. A. Guijarro, P. Domonkos, G. Vertacnik, T. Szentimrey, P. Stepanek, P. Zahradnicek, J. Viarre, G. Müller-Westermeier, M. Lakatos, C. N. Williams, M. J. Menne, R. Lindau, D. Rasol, E. Rustemeier, K. Kolokythas, T. Marinova, L. Andresen, F. Acquotta, S. Fratianni, S. Cheval, M. Klancar, M. Brunetti, C. Gruber, M. Prohom Duran, T. Likso, P. Esteban, and T. Brandsma; 2012. Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Climate of the Past*, 8, 89-115, doi:10.5194/cp-8-89-2012.