

CRA

CONSIGLIO PER LA RICERCA
IN AGRICOLTURA E L'ANALISI
DELL'ECONOMIA AGRARIA

Unità di ricerca per la
climatologia e la meteorologia
applicate all'agricoltura

mipaaf

Ministero delle
politiche agricole
alimentari e forestali

Atlante Italiano del Clima e dei Cambiamenti Climatici

Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria

Unità di ricerca per la climatologia e la meteorologia applicate all'agricoltura

ATLANTE ITALIANO DEL CLIMA E DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

CRA-CMA

Roma 2015

Autori

Stanislao Esposito, Maria Carmen Beltrano, Flora De Natale, Edmondo Di Giuseppe, Luigi Iafrate, Angelo Libertà, Barbara Parisse e Massimo Scaglione

Coordinamento editoriale a cura di

Stanislao Esposito, Maria Carmen Beltrano, Flora De Natale, Barbara Parisse

ISBN 978-88-97081-80-7

Citazione bibliografica

Esposito S., Beltrano M. C., De Natale F., Di Giuseppe E., Iafrate L., Libertà A., Parisse B. e Scaglione M., 2015 - ***Atlante italiano del clima e dei cambiamenti climatici***. Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Unità di ricerca per la climatologia e la meteorologia applicate all'agricoltura. Roma, pp. 264.

Copyright

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Copertina

Adamo Medulli

Layout e impaginazione

Stanislao Esposito, Maria Carmen Beltrano, Flora De Natale, Barbara Parisse

Stampa

Pioda Imaging srl - Roma

Finito di stampare a Roma nel mese di giugno, 2015

Note legali

Il Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria e gli autori di questo volume declinano ogni responsabilità derivante dall'uso che può essere fatto delle informazioni in esso contenute.

Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria
Unità di ricerca per la climatologia e la meteorologia applicate all'agricoltura
Via del Caravita, 7a - 00186 Roma
Tel. 06 695311
E-mail: cma@entecra.it

L'Atlante italiano del clima e dei cambiamenti climatici è un prodotto realizzato nell'ambito della linea di ricerca "Previsioni agrometeorologiche finalizzate alla meccanizzazione agricola in relazione all'adattamento ai cambiamenti climatici" del progetto "Agrosceari - Scenari di adattamento dell'agricoltura italiana ai cambiamenti climatici" finanziato dal Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali con D.M. 8608/7303/08 del 07/08/2008.

*Nel gran laboratorio della natura accadono fuor di dubbio degli effetti,
de' quali impossibile, od almeno difficilissimo riuscirà agli uomini d'indovinar le cause,
e queste anche conosciute, di potervi apportare correzione, o modificazione».*

Giuseppe Castellani, 1818

INDICE

Prefazione	7
Presentazione	9
Introduzione	11
Il concetto di cambiamento climatico nella sua evoluzione storica	17
Ricostruzione delle variabili meteorologiche al suolo	33
Procedure di elaborazione per l'atlante	53
Bibliografia	58
Tavole delle variabili climatiche di base 1981-2010	63
<i>Temperatura minima</i>	
– Medie mensili da gennaio a dicembre	64
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	76
– Media annua	80
<i>Temperatura massima</i>	
– Medie mensili da gennaio a dicembre	81
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	93
– Media annua	97
<i>Temperatura media</i>	
– Medie mensili da gennaio a dicembre	98
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	110
– Media annua	114
<i>Escursione termica</i>	
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	115
<i>Precipitazione</i>	
– Totali mensili da gennaio a dicembre	119
– Totali stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	131
– Totale annuo	135
<i>Umidità relativa</i>	
– Media diurna e notturna di gennaio	136
– Media diurna e notturna di luglio	138
Tavole delle variabili climatiche di base 1971-2000	141
<i>Temperatura minima</i>	
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	142
– Media annua	146
<i>Temperatura massima</i>	
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	147
– Media annua	151
<i>Temperatura media</i>	
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	152
– Media annua	
<i>Precipitazione</i>	
– Totali stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	157
– Totale annuo	161

Tavole delle variabili climatiche di base 1961-1990	163
<i>Temperatura minima</i>	
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	164
– Media annua	168
<i>Temperatura massima</i>	
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	169
– Media annua	173
<i>Temperatura media</i>	
– Medie stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	174
– Media annua	178
<i>Precipitazione</i>	
– Totali stagionali: inverno, primavera, estate e autunno	180
– Totale annuo	183
Tavole degli indici climatici e agroclimatici 1981-2010	185
– Numero medio annuo di notti tropicali	186
– Numero medio annuo di giorni estivi	187
– Numero medio annuo di giorni con temperatura massima maggiore di 30 °C	188
– Sommatorie termiche annue (soglia 0, 5, 10, 15 e 20 °C)	189
– Evapotraspirazione potenziale mensile (maggio – agosto)	194
– Bilancio idroclimatico mensile (maggio – agosto)	198
Tavole degli indici climatici e agroclimatici 1961-1990	203
– Numero medio annuo di notti tropicali	204
– Numero medio annuo di giorni estivi	205
– Numero medio annuo di giorni con temperatura massima maggiore di 30 °C	206
– Sommatorie termiche annue (soglia 0, 5, 10, 15 e 20 °C)	207
– Evapotraspirazione potenziale mensile (maggio – agosto).....	212
– Bilancio idroclimatico mensile (maggio – agosto)	216
Indicatori di cambiamento climatico	221
– Notti tropicali	222
– Giorni estivi	223
– Escursione termica giornaliera	224
– Periodi di caldo	225
– Periodi di freddo	226
– Durata della stagione vegetativa	227
– Giorni caldi	228
– Notti calde	228
– Giorni freddi	229
– Notti fredde	229
– Precipitazione massima giornaliera	230
– Intensità di pioggia giornaliera	230
– Numero di giorni con precipitazione intensa	231
– Precipitazione totale nei giorni molto piovosi	231
– Discontinuità nelle serie di temperatura e precipitazione	232
Tabelle climatiche 1981-2010 per aree geografiche	235

Prefazione

Il clima è un elemento fondamentale dell'ambiente da cui dipendono gran parte dei presupposti che rendono possibile la vita e, in ultima analisi, il benessere dell'uomo. La natura del rapporto uomo - clima (imprescindibile nei fatti, reciproco negli effetti) è continuamente mutata nel corso dei millenni di pari passo con l'evoluzione del genere umano e dei suoi assetti sociali.

Attualmente, nonostante le più solide conoscenze scientifiche ed il maggiore discernimento razionale, l'interazione uomo-clima risente ancora di retaggi ancestrali e abbastanza spesso risulta influenzata da scarsa o cattiva informazione, da labile "memoria climatica" o addirittura dal mero conformismo al pensiero di massa. Anche se probabilmente i fenomeni climatici non sono più ritenuti strumenti premianti o punitivi della volontà Divina, il clima o, per meglio dire la percezione che ne riceviamo, appare ancora oggi confinata nella sfera istintuale ed emozionale. A nostra parziale discolpa, tuttavia, è doveroso aggiungere che esiste una difficoltà oggettiva che contrasta con una più logica e corretta conoscenza del clima, rappresentata da fattori di scala spaziali e temporali che differenziano nettamente colui che osserva (l'uomo) e chi è osservato (il clima). Una singola persona, infatti, benché dotata di eccellente memoria e notevoli capacità razionali, può al massimo avere esperienza degli eventi climatici occorsi nel limitato arco della sua vita e nel circoscritto ambito territoriale di dove ha vissuto.

Considerate la complessità e la variabilità della fenomenologia atmosferica, nonché le dimensioni spazio-temporali del pianeta Terra, si può facilmente immaginare quanto possa essere improbabile qualsiasi raffronto fra percezione e nozione di clima. Qualsiasi approccio alla conoscenza oggettiva del clima che vada oltre le esperienze sensoriali/emotive dirette, deve necessariamente basarsi su solide e longeve basi informative, nonché su metodologie di analisi di assoluto rigore scientifico. Secondo quest'ottica, il presente Atlante è stato concepito proprio per fornire un quadro aggiornato e scientificamente rigoroso del clima del territorio italiano e dei cambiamenti climatici in corso che ne stanno in parte modificando sensibilmente le tradizionali caratteristiche.

Al fine di restituire una rappresentazione oggettiva, attuale, chiara e corretta di questi aspetti, gli autori si sono avvalsi di una base informativa del tutto idonea allo scopo prefissato, sia in termini di copertura territoriale, sia in termini di ampiezza del periodo temporale considerato (1961-2010). I dati di base utilizzati derivano da fonte istituzionale (Sistema informativo agricolo nazionale del Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali) e soddisfano adeguatamente i requisiti di affidabilità e confrontabilità raccomandati dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale essendo stati anche preliminarmente processati per accertarne il grado di coerenza spaziale, di consistenza temporale e di qualità intrinseca.

Per quanto riguarda le elaborazioni numeriche e le rappresentazioni cartografiche, sono state adottate metodologie e procedure idonee a garantire la correttezza e la significatività dei risultati, nonché un eventuale trasferimento di questi in concrete applicazioni operative. Diverse sono le variabili considerate e numerosi gli indici climatici derivati che restituiscono nel complesso, ma anche secondo l'opportuno dettaglio stagionale e territoriale considerato, un utile strumento informativo sui limiti e sulle potenzialità climatiche del nostro territorio, soprattutto per quanto riguarda la valutazione delle idoneità agro-ambientali.

In definitiva, nell'attuale situazione di incertezze che sempre più spesso vede le ragioni dello sviluppo economico e della crescita demografica contrapporsi agli equilibri climatico-ambientali, questo atlante vuol rappresentare un contributo della ricerca scientifica per definire, seppure a scala nazionale, le misure idonee ad assicurare nel medio-lungo periodo i necessari criteri di sostenibilità.

Luigi Perini
Direttore del CRA-CMA

Presentazione

Nel 2008, prima che lasciassi la direzione dell'allora Consiglio per la ricerca e la sperimentazione in agricoltura - Unità di ricerca per la climatologia e la meteorologia applicate all'agricoltura (CRA-CMA), il Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali (Mipaaf) finanziò il progetto "Agroscenari - Scenari di adattamento dell'agricoltura italiana ai cambiamenti climatici", affidandone al CRA-CMA anche la conduzione delle attività operative-amministrative e decretò nel contempo che assumessi la responsabilità del Coordinamento generale.

La finalità di Agroscenari era in primo luogo quella di individuare, valutandone la sostenibilità, le modalità di adattamento ai cambiamenti climatici (CC) dei principali sistemi produttivi dell'agricoltura italiana. Il progetto mirò dunque a predisporre strumenti cognitivi e decisionali, che permettessero in primo luogo al Mipaaf di orientare l'attività agricola verso forme di adattamento e/o mitigazione dei CC secondo criteri di sostenibilità ambientale ed economica. Agroscenari, non entrando nel merito delle cause dei CC, ritenne che l'acquisizione delle conoscenze utili a preparare l'agricoltura italiana ad affrontare gli scenari futuri rappresentasse un investimento necessario per salvaguardare il territorio da uno sfruttamento non sostenibile e per sostenere la stessa agricoltura, fonte di produzione economica primaria e di sostentamento alimentare.

In questo quadro Agroscenari ha dato luogo ad una notevole produzione scientifica e sono particolarmente felice di vedere annoverato in essa anche un prodotto editoriale specialistico, che potrà certamente risultare di utilità, oltre che per l'agricoltura italiana, anche per i diversi altri settori di vita della comunità civile. Si tratta di questo Atlante italiano del clima e dei cambiamenti climatici che è stato realizzato per offrire un quadro informativo aggiornato sul clima dell'Italia negli ultimi cinquant'anni.

L'idea è nata dalla consapevolezza che le pubblicazioni che analizzano il clima del nostro Paese attualmente disponibili risentono, a volte, di una trattazione troppo remota, oppure sono strutturate solo come elenchi tabellari relativi a serie meteorologiche riferite ai siti di osservazione. Il progetto editoriale è stato attuato dal CRA-CMA, nell'ambito della linea di ricerca "Previsioni agrometeorologiche finalizzate alla meccanizzazione agricola in relazione all'adattamento ai cambiamenti climatici". La messa a punto di un tale atlante faceva parte peraltro delle raccomandazioni elencate nel Libro Bianco edito nel 2012 dal Mipaaf "Sfide e opportunità dello sviluppo rurale per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici".

Per realizzare l'atlante sono state rielaborate serie meteorologiche affidabili, utilizzate anche in Agroscenari, e distribuite sul territorio nazionale in modo da garantire un'adeguata rappresentazione spaziale. Un atlante climatico ha il compito di illustrare sinteticamente e nel modo più chiaro possibile le caratteristiche medie del territorio e gli aspetti di variabilità spazio-temporale che lo connotano. Nel caso specifico, l'atlante si configura come un'opera di cartografia tematica, ideata allo scopo di illustrare il clima del nostro Paese e le sue variazioni, attraverso l'elaborazione delle principali grandezze meteorologiche e di alcuni indici climatici e agroclimatici riferiti a tre diversi trentenni: 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010. Questa scelta si è basata sulla volontà di fornire informazioni standardizzate e offrire diversi termini di confronto. I tre trentenni, anche se parzialmente sovrapposti, mostrano quanto e in che modo la scelta del periodo di riferimento possa condizionare i risultati di un qualsiasi studio sui cambiamenti climatici. Nel volume le elaborazioni climatiche sono presentate in forma di mappe, grafici e tabelle. I dati scientifici in esso contenuti, ne sono certo, costituiranno un utile supporto di conoscenza a sostegno della comunità scientifica e degli operatori che a diverso titolo operano nel settore specifico sul territorio.

Un ringraziamento molto sentito va naturalmente anche al Mipaaf, che ha dato fiducia ai ricercatori di Agroscenari e ha creato i presupposti finanziari perché il Progetto potesse realizzarsi.

Complimenti infine a chi ha condotto in porto la redazione dell'atlante, in particolare ai ricercatori Esposito, responsabile della ricerca, Beltrano, De Natale, Di Giuseppe, Iafrate, Libertà, Parisse e Scaglione.

Ad essi anche l'augurio per il futuro delle loro attività di ricerca.

Domenico Vento
Coordinatore generale del progetto Agroscenari

Introduzione

Da sempre il clima rappresenta una risorsa naturale di vitale importanza per tutte le attività umane. Di conseguenza la conoscenza delle caratteristiche climatiche del territorio, nei suoi diversi aspetti, supporta i processi decisionali della pianificazione di tutti i settori dell'economia, riducendo i rischi ambientali e ottimizzando i benefici economici e sociali.

In questa ottica l'agricoltura, il turismo, i trasporti, in quanto fortemente condizionati dagli andamenti meteorologici, devono essere strutturati in relazione alle condizioni climatiche. Anche la produzione di energia, idroelettrica, eolica o solare, è direttamente influenzata dal clima, così come la realizzazione di infrastrutture o la progettazione in edilizia e la stessa ricerca scientifica non possono prescindere dalla conoscenza degli elementi climatici.

La gestione complessiva delle risorse del territorio anche al fine di prevenzione e difesa, il monitoraggio degli ecosistemi e la stessa salvaguardia della sicurezza e della salute umana possono essere meglio pianificati se sono note le caratteristiche del clima, specialmente per quanto riguarda i fenomeni estremi quali, ad esempio, le piogge alluvionali, la siccità prolungata, le ondate di calore o di freddo.

Un interesse ulteriore, legato alla necessità di avere un quadro conoscitivo aggiornato delle condizioni climatiche, riguarda il tema dei cambiamenti climatici. In questi ultimi anni l'intensificarsi di eclatanti -e troppo spesso drammatici- eventi meteorologici avversi ha aumentato anche nell'opinione pubblica la consapevolezza che le modificazioni del clima del pianeta non sono possibilità più o meno remote, ma già da oggi influiscono in modo negativo sulla vita quotidiana di ciascuno di noi. Di fronte a questo diffuso interessamento per i diversi aspetti legati al clima, che riguarda non solo il mondo scientifico ma coinvolge tutti, dal *policy maker* al semplice cittadino, va sottolineato che il sistema climatico è molto complesso, in quanto è fortemente connesso con i continui scambi di energia e materia, non del tutto noti, tra i diversi sottosistemi - atmosfera, idrosfera (compresi i ghiacci oceanici della criosfera), litosfera (rocce, suolo) e biosfera (organismi viventi, flora) - che interagiscono per assicurare il riequilibrio energetico alle diverse scale spaziali e temporali.

Molto spesso, nel linguaggio comune, le parole **tempo** (meteorologico o atmosferico) e **clima** si usano come sinonimi, non

distinguendo le differenze esistenti tra le due espressioni e pertanto è opportuno chiarire il significato dei due termini. Anche se sono tra loro collegati in quanto gli elementi che li caratterizzano sono gli stessi, essi sono concettualmente differenti, sia per quanto riguarda il tempo cronologico entro il quale vengono analizzati e sia per il metodo di analisi che viene utilizzato.

In senso ampio, il tempo rappresenta l'insieme delle condizioni meteorologiche (temperatura, pressione e umidità atmosferica, venti, nuvolosità, precipitazioni, ecc.) che avvengono nella troposfera (strato più basso dell'atmosfera) e del loro evolversi, in un determinato momento, (che può essere di minuti, di ore o anche di uno o più giorni) in un dato luogo (scala locale, regionale, nazionale, ecc.). In ogni caso il tempo atmosferico è una realtà fisica direttamente osservabile e misurabile, istante per istante, che evolve con continuità in modo molto complesso ma che è certamente regolato dalle leggi della fisica (Rosini, 1988).

Il termine clima (dal greco *klima*) in origine era inteso semplicemente come inclinazione di un territorio rispetto ai raggi solari incidenti sulla superficie terrestre. Nel corso della storia della climatologia a questa prima spiegazione si sono aggiunte numerose descrizioni di clima e ognuna tende a porre l'accento su aspetti diversi a seconda del settore scientifico nella quale viene applicata (meteorologico, biologico, ecologico, ecc.). Senza voler entrare nel merito delle singole definizioni di illustri climatologi, riportiamo solo quella dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM/WMO): "*Il clima è definito come la sintesi delle condizioni meteorologiche in una determinata area, caratterizzata da statistiche di lungo periodo (valori medi, varianza, probabilità dei valori estremi ecc.) degli elementi meteorologici in quell'area*" (WMO, 1992). Questa definizione, facendo riferimento ad un periodo lungo e introducendo il concetto di statistica, indica che il clima non è un qualcosa di fisso e nemmeno è riconducibile al solo valore medio. Esso, invece, deve essere inteso come regolare oscillazione dei fenomeni meteorologici e, quindi, la sua analisi deve necessariamente essere centrata sulla variabilità e sulla dispersione della serie di dati meteorologici rispetto ad un valore medio.

Oltre che nei bollettini meteo, anche nel linguaggio comune o nei media si usa spesso il concetto di "valore normale", "media climatica", "normale climatica" o semplicemente "norma" quan-

do, ad esempio, si afferma che: “la temperatura media mensile è stata superiore al normale” oppure “la pioggia dello scorso anno è stata inferiore alla norma”. Il significato di questi termini, tutti sinonimi, si può far risalire al 1935 quando l’allora Organizzazione Meteorologica Internazionale (precursore dell’attuale OMM) propose per gli studi climatologici il trentennio 1901-1930 come “periodo climatico normale” per valutare le caratteristiche climatiche di una località, il loro manifestarsi e stabilizzarsi.

Successivamente l’OMM ha confermato come “norma” i valori medi di osservazioni meteorologiche (dal 1° gennaio al 31 dicembre) calcolati per un periodo uniforme e relativamente lungo di tre decenni consecutivi. A livello internazionale è importante mantenere lo stesso periodo di riferimento, affinché le informazioni sul clima siano coerenti anche oltre i confini di un singolo Paese. Attualmente, le medie di dati climatici calcolate per i seguenti periodi consecutivi: 1° gennaio 1901-31 dicembre 1930, 1° gennaio 1931-31 dicembre 1960, 1° gennaio 1961-31 dicembre 1990 sono chiamate “normali climatologiche” (Cli. No.). Nel 2011, l’OMM ha confermato l’uso del periodo 1961-1990 come Cli.No. fino al 2021, cioè fino a quando il trentennio 1° gennaio 1991-31 dicembre 2020 diventerà il nuovo periodo di base (WMO, 2012).

Accanto al periodo standard 1961-1990, l’OMM ha ritenuto opportuno utilizzare altri periodi di riferimento (normali), aggiornati ogni 10 anni (WMO, 2007). In tal modo il trentennio 1981-2010 rappresenta il periodo base in corso fino al 2021: esso descrive più fedelmente il clima presente e può rappresentare meglio il clima del futuro più prossimo (WMO, 2011, 2012).

Per il nostro Paese, già in occasione del XVIII Congresso Geografico Italiano, svoltosi a Trieste dal 4 al 9 aprile 1961, il noto geografo Alberto Mori presentava un interessante “progetto” finalizzato alla realizzazione di un Atlante climatico per l’Italia (Mori, 1962). A quel tempo, a differenza di molti paesi stranieri, l’Italia era del tutto priva di una analoga pubblicazione. La proposta del Mori non sortì il risultato sperato e, per l’Italia, continuarono ad essere disponibili soltanto una serie di carte e cartine climatiche realizzate in precedenza, in bianco e nero ed a colori che rappresentavano le principali grandezze meteorologiche.

Occorre rilevare che già un secolo prima, nel 1839, due rudimentali carte climatiche d’Italia inerenti alla distribuzione di temperatura e precipitazioni, le prime storicamente note, erano

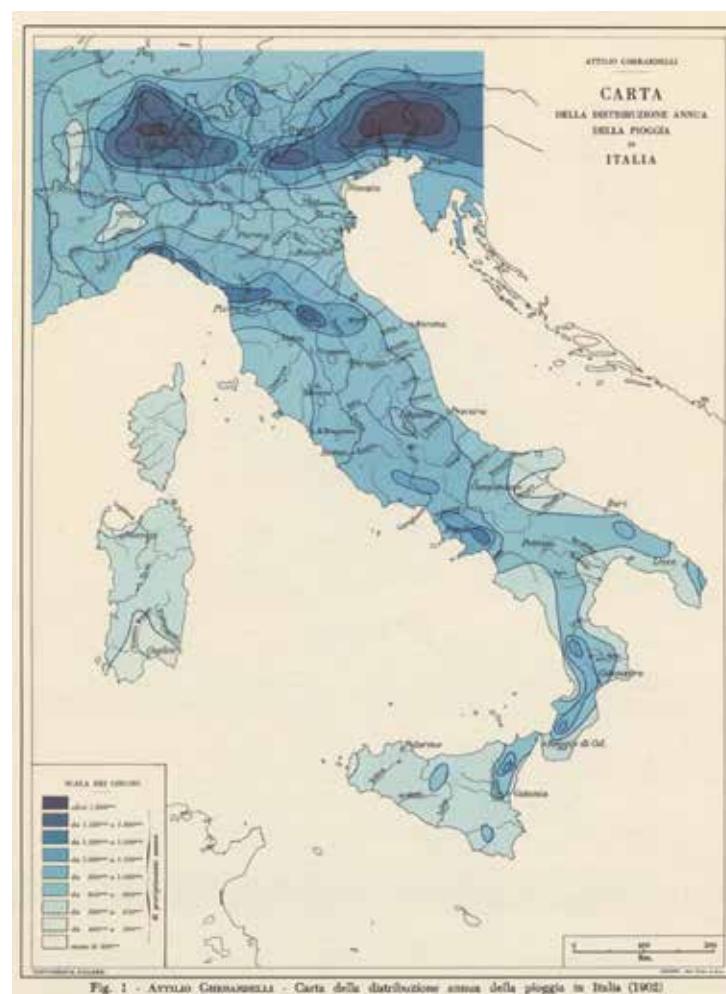


Fig. 1 - Carta della distribuzione annua della pioggia in Italia (1902)

state pubblicate a corredo del volume *Tableau du climat et de la végétation de l'Italie: résultat de deux voyages en ce pays dans les années 1817-1819 et 1829-1830*, elaborato dal geobotanico e climatologo danese Joakim Frederik Schouw.

Nei primi anni del XX secolo il nostro Paese disponeva di una *Carta della distribuzione annua della pioggia in Italia* (fig. 1) tracciata da Attilio Gherardelli, topografo dell’Istituto Geografico Militare (IGM), sulla base dei pochi dati pluviometrici nazionali disponibili a cavallo del XIX e XX secolo. Essa apparve nell’edizione italiana dell’opera del geografo tedesco Theobald Fischer *La penisola italiana: Saggio di corografia scientifica*, edita nel 1902 e per molto tempo la migliore descrizione geografica del Paese. Questa carta era la prima rappresentazione cartografica della distribuzione media annua delle precipitazioni su scala nazionale in grado di fornire una visione di sintesi e, al tempo stesso, evidenziare i caratteri fondamentali del fenomeno.



Fig. 2 - Carta della precipitazione medie annua (1908)

Successivamente, nel 1908 furono pubblicate le *Carte della precipitazione media annua e mensile in Italia* (fig. 2) redatte dal climatologo Filippo Eredia, come appendice al suo interessante studio *Le precipitazioni atmosferiche in Italia*. Il lavoro si basava sui dati di 215 stazioni, funzionanti almeno dal 1887 al 1905, e si presentava molto più completo rispetto ai precedenti. Le carte coprivano l'intera Penisola ed erano dotate di opportune scale colorimetriche.

In seguito fu realizzata la *Carta della quantità di pioggia in Italia*, disegnata nel 1906 dal medico e naturalista fiorentino Giorgio Roster. Essa fu inserita nel suo lavoro *Climatologia dell'Italia nelle sue attinenze con l'igiene e con l'agricoltura, preceduta da uno studio sui fattori climatici in genere*, uscito nel 1909. È piuttosto sommaria (scala 1:4.000.000) e divide l'Italia in sette zone.

In quello stesso anno vennero anche pubblicate la *Carta delle isoterme annue*, la *Carta delle isoterme del gennaio* e la *Carta delle isoterme del luglio in Italia* (1909). Annoverate tra le più an-



Fig. 3 - Carta della temperatura minima annua (1940)

tiche carte isoterme della Penisola, anch'esse furono elaborate da Giorgio Roster e poi pubblicate, come tavole, nella citata *Climatologia dell'Italia*. Le carte sono alla scala 1:4.000.000 e, nonostante la scarsità dei dati termometrici utilizzati per disegnarle, si distinguono per la discreta aderenza delle isoterme alla complessa realtà geografica del territorio italiano. Tengono, infatti, opportunamente conto del fattore altimetrico, soprattutto per la regione alpina.

Nel 1909 fu anche realizzata la *Carta della temperatura media annua in Italia* a cura di Filippo Eredia, poi pubblicata come tavola nel suo studio *La temperatura dell'aria in Italia* (Eredia, 1909). La sua scala è però più piccola (1:5.000.000) di quella delle carte isoterme del Roster, mentre le sue isoterme seguono direttrici piuttosto generiche. Essa appare meno particolareggiata rispetto alla *Carta della temperatura media annua in Italia* che l'Eredia disegnò più di tre decenni dopo (1942).

Ad opera di Giuseppe Crestani fu la *Carta della temperatura media annua in Italia* (1931). La carta è riprodotta alla pagina 237 della sua *Climatologia* (Torino, UTET, 1931) ed è piuttosto simile alla carta isotermica dell'Eredia del 1909, ma la sua scala è più piccola (1:8.000.000). Il merito del Crestani fu quello di aver esteso le isoterme ai territori del Trentino-Alto Adige e del Friuli Venezia Giulia, compresa l'Istria.

Nell'*Atlante fisico-economico d'Italia* del Touring Club Italiano (1940) realizzato dal geografo naturalista Giotto Dainelli troviamo delle *Carte climatiche* che costituiscono una raccolta cartografica piuttosto accurata, che caratterizza il clima del territorio italiano e rappresenta principalmente la distribuzione media annua e stagionale dei fenomeni atmosferici fondamentali, in primo luogo temperatura (fig. 3) e precipitazioni.

Allegata al *Fascicolo XIII* della "Pubblicazione n. 24" del Servizio Idrografico, edito nel 1961 troviamo la *Carta della precipitazione media annua in Italia per il trentennio 1921-1950* (fig. 4). A tracciare le isoiete fu l'ingegnere Pietro Frosini, sulla base dei dati pluviometrici di ben 2.372 stazioni. La carta, la cui scala è 1:1.000.000, è una rappresentazione alquanto particolareggiata della distribuzione media annua delle precipitazioni cadute sul territorio italiano nel trentennio 1921-1950. In quello stesso periodo fu realizzata anche la *Carta delle linee dei massimi periodi con precipitazione nulla, nel quarantennio 1921-1960* ad opera dell'ingegnere Tomaso Gazzolo e del geometra Guido Bassi alla scala 1:1.000.000.

Nel 1969 fu prodotta la *Carta delle temperature medie annue in Italia – Trentennio 1926-1955* (1969), acclusa alla monografia del Servizio Idrografico *La distribuzione della temperatura dell'aria in Italia nel trentennio 1926-1955*, elaborata dallo stesso Gazzolo e dal climatologo Mario Pinna. Tale carta venne costruita per colmare le evidenti lacune riscontrabili nell'ambito specifico delle carte isotermiche, le quali non erano ancora in grado di fornire un quadro sufficientemente puntuale delle variazioni della temperatura media in Italia. Essa ha il vantaggio di avere una scala maggiore rispetto alle precedenti (1:1.000.000) e di essere stata disegnata utilizzando i valori termometrici medi di un maggior numero di stazioni (ben 612) e relativi ad un periodo di osservazione più lungo, il trentennio 1926-1955 per l'appunto. A completamento delle serie cartografiche edite dal Servizio Idrografico, nella Pubblicazione n. 26 del 1973 troviamo le *Carte della nevosità in Italia nel quarantennio 1921-1960*.

Una raccolta sicuramente degna di menzione, pubblicata in tre volumi dal 1967 al 1973, è *Il clima d'Italia nelle sue caratteri-*



Fig. 4 - Carta della precipitazione media annua in Italia per il trentennio 1921-1950 (1961)

stiche e varietà e quale fattore dinamico del paesaggio; il suo autore è lo studioso Cristofaro Mennella. L'opera costituisce il primo lavoro esauriente sulla caratterizzazione climatologica della Penisola e si distingue anche per le diverse carte climatiche che vi sono riprodotte.

A tutt'oggi, l'Italia continua ad essere sprovvista di un atlante climatico vero e proprio relativo a tutto il territorio nazionale. Nel corso degli ultimi anni, suppliscono parzialmente a tale lacuna gli atlanti climatici regionali quali, per citarne solo qualcuno, quello dell'Emilia Romagna, del Friuli Venezia Giulia, della Liguria, del Piemonte, della Puglia, della Sicilia, della Provincia autonoma di Trento, della Valle d'Aosta, del Veneto. In verità, non sembra che la mancanza di un Atlante climatico nazionale

sia stata, fino ad oggi, particolarmente sentita. Spesso, la “preoccupazione” dei climatologi è stata principalmente quella di raccogliere ed elaborare i risultati delle misure meteorologiche delle diverse località in una sorta di ponderosi lavori organici di climatologia, aventi come scala l'intero territorio nazionale. In tal senso l'*Atlante climatico d'Italia: 1971-2000*, realizzato dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare e pubblicato in tre volumi nel 2008, pur costituendo un validissimo lavoro circa la caratterizzazione del clima italiano più recente, non può, nella sua accezione più rigorosa, considerarsi un vero e proprio atlante, trattandosi di una voluminosa opera di raccolta ed elaborazione di dati meteorologici rilevati nelle diverse stazioni del Servizio disseminate sul territorio nazionale.

A questo lavoro dell'Aeronautica Militare si aggiunge la recentissima pubblicazione dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale *Valori climatici normali di temperatura e precipitazione in Italia* (Desiato et al., 2015), nella quale sono pubblicati i valori normali mensili e annuali di temperatura media, minima e massima e di precipitazione cumulata, riferiti a singole stazioni e a diversi periodi climatici, e alcune mappe climatiche a scala nazionale di temperatura (1961-1990) e di precipitazione (1951-1980).

Per rispondere in modo più esaustivo all'esigenza di un vero e proprio atlante climatico nazionale, il Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria - Unità di ricerca per la climatologia e la meteorologia applicate all'agricoltura (CRA-CMA) ha realizzato l'*Atlante italiano del clima e dei cambiamenti climatici*, nell'ambito della linea di ricerca “Previsioni agrometeorologiche finalizzate alla meccanizzazione agricola in relazione all'adattamento ai cambiamenti climatici” del progetto “AGROSCENARI - Scenari di adattamento dell'agricoltura italiana ai cambiamenti climatici”. Questo nuovo volume dà continuità all'*Atlante Agroclimatico - agroclimatologia, pedologia, fenologia del territorio italiano* pubblicato nel 2004 dall'allora Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA, attuale CRA-CMA) nell'ambito del progetto “CLIMAGRI - Cambiamenti climatici e agricoltura”.

L'odierno lavoro, relativo all'intero territorio nazionale, affiancandosi alle numerose rappresentazioni climatiche già realizzate in passato, si riallaccia idealmente al vecchio progetto di Alberto Mori. Le carte climatiche a grande scala pubblicate in questa sede si riferiscono ai trentenni 1961-1990 (Cli.No.), 1971-2000 (clima recente) e 1981-2010, con-

siderato il periodo riferimento del clima attuale. Le elaborazioni climatiche sono state realizzate per fornire un quadro d'insieme aggiornato e sintetico rappresentativo del clima del nostro Paese.

Le tavole cartografiche, i grafici e le tabelle mostrano gli andamenti climatici degli ultimi cinquant'anni; per i diversi trentenni sono descritti i valori medi mensili, stagionali e annuali della temperatura, dell'umidità, delle precipitazioni e di alcuni indici climatici. Facendo riferimento al settore agricolo, oltre ai classici prodotti climatologici, sono state effettuate specifiche elaborazioni per la caratterizzazione agroclimatica del territorio italiano.

Come generalmente avviene per gli studi climatici, il dato di partenza è di tipo puntuale e proviene da stazioni meteorologiche più o meno omogeneamente distribuite sul territorio di analisi, spesso appartenenti a più reti di rilevamento, in grado di assicurare una idonea serie storica. Per ottenere la rappresentazione della distribuzione territoriale delle variabili sull'intera superficie nazionale si è fatto ricorso a procedimenti di spazializzazione dei dati di base, generando così delle statistiche climatiche interpolate. Un capitolo è dedicato alla descrizione della metodologia di stima utilizzata per ottenere i dati puntuali di base impiegati nelle diverse elaborazioni.

Un capitolo di climatologia storica illustra i risultati di un'indagine bibliografica sull'evoluzione del concetto di “cambiamenti climatici”, condotta sulla base degli studi compiuti in tutto il mondo. Vi sono riportati i contributi più originali e significativi sul tema, a partire dal XVII secolo fino alla fine del secolo scorso.

L'*Atlante italiano del clima e dei cambiamenti climatici* nasce, quindi, dalla consapevolezza della crescente importanza riconosciuta al clima e ai cambiamenti climatici in tutte le attività umane, per offrire un riferimento a livello nazionale che descriva, in modo accurato e per quanto possibile completo, le caratteristiche climatiche a seconda del periodo cui si fa riferimento. Le informazioni in esso descritte possono essere di supporto nella programmazione e pianificazione di medio e lungo periodo, non solo nel settore agricolo, ma anche per le diverse applicazioni in altri settori produttivi.

Il concetto di “cambiamento climatico” nella sua evoluzione storica

Fin dai tempi più remoti, l'umanità ha sempre avuto la percezione della continua mutevolezza del clima e, pertanto, il concetto di “cambiamento climatico”, contrariamente a quanto comunemente si crede, è anch'esso assai antico. Innumerevoli sono gli autori del passato che ci hanno lasciato testimonianze scritte in materia di variabilità o cambiamento del clima, sebbene si sia dovuto attendere l'avvento della scienza moderna per avere studi più organici sul clima, utili per riconoscerne la variabilità e le modificazioni.

Un vero e proprio approccio scientifico allo studio sistematico del clima si ebbe, tuttavia, solo a partire dal XIX secolo, quando si incominciò ad indagarlo e spiegarne le variazioni attraverso la formulazione di ipotesi, teorie e, infine, modelli fisico-matematici atti a simularne anche l'evoluzione.

Le origini

Già all'inizio del I sec. a.C., Lucio Ostilio Saserna scrisse un trattato agronomico, i cui frammenti sono riportati da Lucio Giunio Moderato Columella (4-70 d.C.) nel *De Re Rustica*: Libro I, Cap. I, da cui emerge che, nel Nord Italia, il clima era mutato rispetto ai secoli precedenti, tanto che regioni in cui era prima impossibile coltivare la vite e l'ulivo, erano, ai tempi dell'autore, ricche di rigogliosi oliveti e vigneti. Gaio Plinio Secondo, noto come Plinio il Vecchio (23-79 d.C.), affermava che il faggio, un tempo presente alla latitudine di Roma, nel I secolo d.C. si era spostato nelle regioni settentrionali del Paese (Plinius Secundus, 1573: Libro XVI, Cap. X).

In effetti, la Climatologia storica ha appurato che il clima europeo, tra il III sec. a.C. ed il III sec. d.C., sperimentò una fase di relativo riscaldamento, dopo un periodo freddo piuttosto lungo, il cui inizio risale al X-IX secolo a.C.. A proposito degli inverni di quest'ultimo periodo, ne sono storicamente noti due davvero memorabili: quello del 400-399 a.C., allorché caddero su Roma sette piedi di neve (almeno 210 cm) e gelò il Tevere (Dionysius Halicarnassensis, 1824: Libro XII, Suppl. 8, p. 392-393), e l'inverno del 275 a.C., quando il Tevere ghiacciò completamente e la neve, a Roma, rimase per 40 giorni (Sant'Agostino, *La Città di Dio*: Libro III, 17.3).

Fino alla metà del 1500, le conoscenze relative alla meteorologia ed al clima si sono fondate prevalentemente sulla dottrina

aristotelica e sull'astrometeorologia. Nel Medioevo, fu soprattutto quest'ultima a condizionare l'interesse, anche dei più colti, per il clima e le sue variazioni, indirizzandolo verso un approccio epistemologicamente differente: le “previsioni” climatiche stagionali su base astrologica. Di probabile origine caldeo-babilonese, l'astrometeorologia pretendeva, per mezzo di calcoli matematici, di predire gli stati futuri dell'atmosfera in funzione del movimento e della posizione degli astri, come testimoniato da predizioni con validità non inferiore all'anno, diffuse attraverso gli almanacchi.

Grandissima, in età medievale, era l'attenzione rivolta alle fasi della Luna, perché il loro influsso sulle vicende climatiche appariva, all'astrologo, preponderante rispetto a quello di tutti gli altri corpi celesti. È da rilevare che neppure i presagi più catastofistici, che mai si avverarono, sortirono l'effetto di screditare l'astrometeorologia, almeno fino al XVIII secolo! Previsioni climatiche a parte, il Medioevo è un'epoca storica di grande interesse per lo studio retrospettivo dei cambiamenti climatici, poiché vede la nascita e la fioritura, soprattutto negli ambienti ecclesiastici, delle più interessanti cronache meteorologiche che precedono l'avvento della meteorologia strumentale. Ricchi di originali lavori ed interessanti spunti di riflessione sul clima del passato saranno i secoli a venire.

I pionieri

Agli inizi dell'Era moderna, il celebre filosofo inglese Francesco Bacone (1561-1626) dava conto di una riscontrata periodicità nell'avvicendamento pluridecennale dei fenomeni meteo-climatici, anticipando, di circa tre secoli, la scoperta di un loro ciclo di durata trentacinquennale (Bacon, 1625). A partire dalla metà del secolo XVII, scienziati italiani di formazione galileiana, per impulso della famiglia de' Medici, si sforzarono di studiare i cambiamenti del clima riscontrati in Italia, rispetto al passato. Il congelamento della Laguna di Orbetello, databile al febbraio 1654, apparve come un evento meteorologico estremo. La sua “severità” fu tale che il granduca di Toscana, Ferdinando II de' Medici, nell'anno stesso, realizzò la prima rete meteo-climatologica della storia, con stazioni ubicate, oltre che in Italia anche all'estero (Cantù, 2004). Lo scopo doveva essere quello di comparare climi di località differenti, per verificare, alla scala europea, la riscontrata tendenza al raffreddamento.

Ebbero così inizio le prime osservazioni meteo-climatologi-

che in senso moderno, tuttora di grande utilità per la ricostruzione della storia climatica della Penisola. A tal proposito, le misure di temperatura rilevate a Firenze, dal 1654 al 1670, nel convento benedettino di Santa Maria degli Angioli, e a Vallombrosa, presso l'Abbazia omonima, dal 1656 e al 1670, assumono un significato scientifico di rilievo ai fini degli studi e delle ricerche di climatologia storica, poiché ricadono nella fase centrale, o meglio più fredda ("pessimum"), della "Piccola Età Glaciale", come chiaramente testimoniano le registrazioni di nevicate nella tarda primavera e in estate. In effetti, queste due serie sono le più complete ed importanti della rete meteorologica medicea, vantando oltre dieci annate di misure termometriche sistematiche (Iafrate, 2008).

Nel secolo successivo, un'interessante *Cronica Meteorologica della Toscana*, scritta dal medico e naturalista Giovanni Targio-

ni Tozzetti (1712-1783), descriveva le ricorrenti gravi carestie connesse con gli eventi meteorologici particolarmente severi o estremi che, dal XII al XVIII secolo, avevano colpito la regione. Egli, oltre ad illustrarne la "storia naturale", dimostrò che la Toscana è soggetta, a causa del suo clima, a frequenti carestie, le quali, non potendo essere evitate, dovevano essere affrontate introducendo la coltivazione di piante ad uso alimentare che meglio potessero resistere "all'inclemenza e incostanza" del clima. Non mancano alcune felici intuizioni scientifiche, come, per esempio, il concetto che il clima non è statico, ma tende a variare nel tempo, e che esiste, comunque, un'evidente correlazione fra una "scorretta" gestione del territorio, in particolare delle risorse forestali, ed alcuni eventi meteo-climatici particolarmente intensi, se non, addirittura, eccezionali (Targioni Tozzetti, 1767).

L'abate e astronomo Vincenzo Chiminello (1741-1815) produsse, nel 1775, un'originale memoria sulle variazioni di piovosità registrate negli ultimi secoli in Europa e sulle relative conseguenze in agricoltura (fig. 5). Il Chiminello prese in considerazione le serie pluviometriche di Padova e Parigi, che all'epoca erano le più lunghe ed ininterrotte. Per la prima serie (oggi la più lunga al mondo e che, già allora, vantava ben cinquant'anni di misure giornaliere), egli si avvalese principalmente degli studi condotti dallo zio materno Giuseppe Toaldo. I valori di piovosità media annua si riferiscono ai sottoperiodi 1725-1749 e 1750-1774. Il loro raffronto evidenziava il significativo aumento delle precipitazioni registrato a Padova durante il secondo venticinquennio. Per spiegare tale incremento, osservato anche nel resto d'Europa, il Chiminello ricorse a cause naturali, sia astronomiche, quali la "diminuzione dell'obliquità dell'eclittica" e le macchie solari, sia terrestri, pur indicando anche cause di origine antropica connesse con l'introduzione delle pratiche agricole (Chiminello, 1776).

Sull'onda dell'approccio illuministico, si collocano anche i lavori dell'astronomo e meteorologo Giuseppe Toaldo (1719-1797) e del filosofo e medico Michele Ventrelli (XVIII secolo). Il Toaldo, fondatore e primo direttore della Specola di Padova (il cui completamento risale al 1777), nel tentativo di riconoscere le principali oscillazioni meteo-climatiche di breve periodo, riuscì ad identificare un ciclo di circa diciotto anni, correlato all'antico ciclo astronomico dei Caldei, meglio noto come "saros". Benché pienamente consapevole dell'impossibilità di avere due situazioni meteorologiche tra loro identiche, egli considerava il ciclo anzidetto di grande utilità ai fini della previsione, e

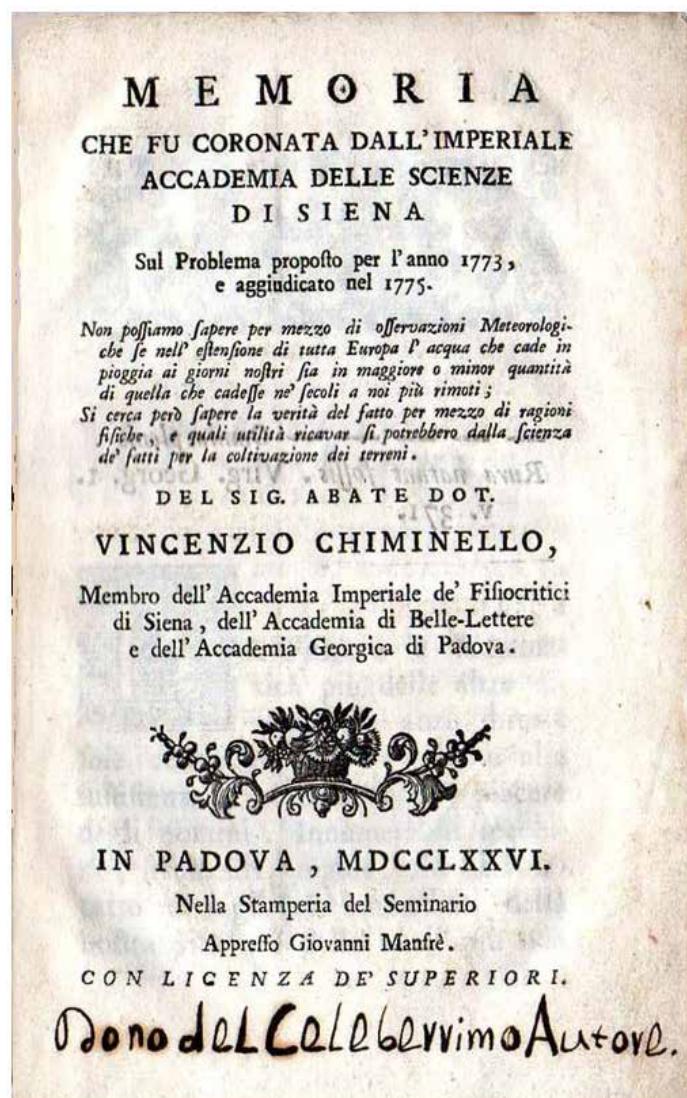


Fig. 5 – Memoria del Chiminello del 1775

dunque della prevenzione, dei possibili casi di carestia connessi con gli eventi meteo-climatici particolarmente severi o estremi (Toaldo, 1802).

Michele Ventrelli, nel 1793, pubblicò una memoria in cui, dopo aver esposto il meccanismo alla base della formazione delle nubi e delle precipitazioni, entra nel merito delle cause geografiche responsabili del clima arido della Puglia, riconducendole fondamentalmente a tre: la totale assenza di rilievi montuosi degni di nota, la mancanza di boschi e la scarsità di acque interne (fig. 6). Egli puntualizzò che, per rendere il clima della Puglia più piovoso, sarebbe occorso semplicemente piantare boschi e costruire torri altissime in grado di sopperire alle montagne mancanti. In questo lavoro, il Ventrelli, precorse, con oltre un secolo di anticipo, il concetto di "modifica artificiale del tempo". Nel tracciare, poi, un confronto tra il clima arido della Puglia e quello piuttosto piovoso di Napoli (nei mesi autunnali

ed invernali), egli rimarca come l'atmosfera di questa città fosse, per mere cause naturali, inquinata da anidride carbonica, acido solfidrico, acido fluoridrico, anidride solforica, metano, nonché da particolato minerale (Ventrelli, 1793).

Al sacerdote agostiniano Carlo Amoretti (1741-1816) si deve un altro importante contributo, anch'esso databile all'ultimo decennio del Settecento. Sull'esempio del lavoro di Hugh Williamson sui cambiamenti del clima avvenuti in America e di altre memorie sull'argomento, Amoretti scrisse il saggio *Sul cangiamento del clima avvenuto in Italia e specialmente in Lombardia* (fig. 7). In questo lavoro, dopo aver accennato al clima italiano e lombardo dei tempi geologici, egli, facendo tesoro delle informazioni meteo-climatiche tramandate da poeti del calibro di Virgilio, Orazio e Giovenale, e da naturalisti e storici come Plinio il Vecchio e Claudio Eliano, si sofferma sul rigore del freddo invernale che, ai loro tempi, attanagliava l'Italia intera.



Fig. 6 – Memoria del Ventrelli del 1793

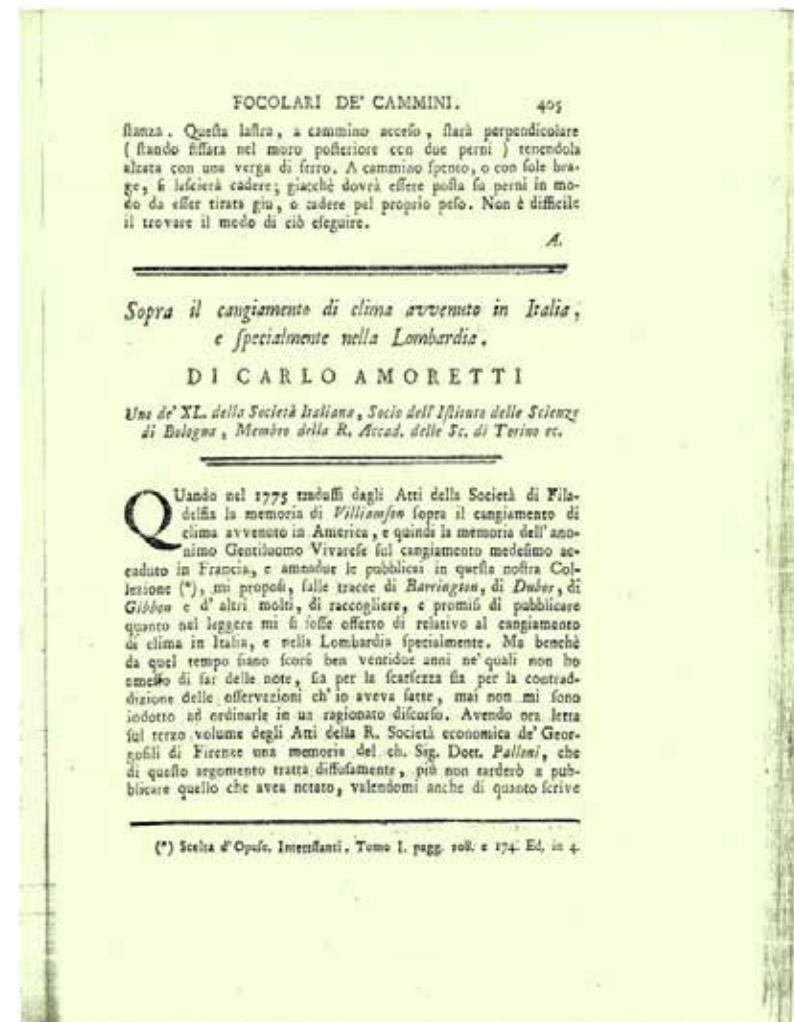


Fig.7 – Memorie dell'Amoretti del 1796

Estendendo, poi, questo suo studio alle vicende climatiche dei secoli successivi, fino a tutto il Settecento, egli giunse alla conclusione che il clima della Lombardia e dell'Italia era, sia nell'Età antica che nel Medioevo, decisamente più freddo rispetto all'ultimo decennio del XVIII secolo. L'Amoretti, per dar conto del riscaldamento climatico allora in atto, chiamava in causa la minore estensione, rispetto al passato, dei terreni ricoperti da paludi e stagni e, al pari del Chiminello, l'agricoltura, per la quale "immensi boschi" erano stati "estirpati" (Amoretti, 1796).

Nell'Ottocento, ben più folto si presentava lo stuolo degli studiosi impegnati nella ricostruzione del clima passato, nel tentativo di accertarne i possibili cambiamenti intervenuti. I loro lavori appaiono molto accurati. Un trentennio caratterizzato da primavere ed estati piuttosto fredde e piovose, notoriamente culminato nell'anno senza estate (1816), spinse l'ingegnere idraulico torinese Giuseppe Castellani a realizzare e dare alle stampe un preoccupato saggio "sull'aumento delle precipitazioni e sul raffreddamento del clima" in atto. In questo studio, egli prende in esame soprattutto le precipitazioni eccessive, i "freddi intempestivi" e il "difetto del calore" che, assai di frequente, caratterizzavano il clima delle stagioni estive del periodo, con impatti sia sull'agricoltura, che si palesavano soprattutto nella distruzione dei raccolti, sia sull'assetto idrogeologico del territorio, a causa delle frequenti alluvioni. Anche Castellani ricercava le principali cause all'origine del riscontrato cambiamento nelle attività antropiche e indicava in modo particolare il disboscamento (Castellani, 1818).

Circa un decennio più tardi, nel 1830, il fisico Guglielmo Libri (1803-1869) presentò all'Accademia delle Scienze di Parigi un lavoro dal titolo *Mémoire sur la détermination de l'échelle du thermomètre de l'Académie del Cimento*, nel quale, comparando i dati dell'antica serie fiorentina rilevata al Convento degli Angeli, dal 1654-1670, con quelli dell'Osservatorio Ximeniano successivi al 1820, conclude che non si rilevano cambiamenti significativi (Libri, 1830).

Le prime ipotesi sulle cause del cambiamento climatico

Nel 1834, il canonico di Monza Angelo Bellani (1776-1852), noto costruttore di strumenti meteorologici, pubblicò il saggio *Sul cangiamento del clima*, che, sebbene sia da considerare aggiornato in fatto di bibliografia, appare poco concludente dal punto di vista scientifico. Si tratta di una serie di considerazioni volte soprattutto a rettificare alcune asserzioni scientifiche sul

tema, fatte dal fisico ed astronomo francese Jean François Dominique Arago (1786-1853), pubblicate nell'*Annuaire du Bureau des Longitudes* per l'anno 1834 (Arago, 1833). Nel suo scritto, tuttavia, Bellani proponeva una prima definizione moderna del concetto di "clima", intendendolo come lo "stato medio di molte successive stagioni" (Bellani, 1834), precorrendo così, di circa mezzo secolo, Julius von Hann (Hann, 1883).

In quegli stessi anni, il dibattito scientifico sulle fluttuazioni climatiche acquisiva nuovi, fondamentali concetti, come l'ipotesi dell'effetto serra e la teoria delle ere glaciali del Quaternario. La ricerca delle cause delle oscillazioni climatiche ha rappresentato e rappresenta tutt'oggi una delle questioni più complesse che le Scienze della Terra sono chiamate a risolvere.

Il primo studioso a proporre, in termini scientifici rigorosi, l'idea che la Terra fosse stata, in tempi passati, soggetta ad un'era glaciale fu Jean Louis Rodolphe Agassiz (1807-1873), biologo, zoologo e paleontologo svizzero (Agassiz, 1840).

Per spiegare i mutamenti del clima terrestre sono state formulate diverse ipotesi, fondamentalmente riconducibili a fattori di ordine astronomico e terrestre. Lo scienziato scozzese James Croll (1821-1890) è storicamente indicato come il principale promotore, nel corso del XIX secolo, della teoria astronomica dei cambiamenti climatici. Le sue intuizioni fondamentali in merito al ruolo dei fattori astronomici e geofisici nella dinamica delle variazioni climatiche sono state estremamente influenti. In suo articolo del 1864, egli ipotizzava che variazioni nell'eccentricità dell'orbita terrestre, combinate con il fenomeno della precessione degli equinozi e dello spostamento del perielio, provocando, alternativamente periodi freddi e caldi in ciascuno degli emisferi, fossero sufficientemente rilevanti per dare l'avvio ai cambiamenti climatici estremi evidenziati dalla geologia: periodi glaciali e interglaciali. In conseguenza di quest'ipotesi, le fasi glaciali ed interglaciali non si manifesterebbero mai contemporaneamente nei due emisferi terrestri, ma risulterebbero invertite (Croll, 1864, 1875). A James Croll si deve anche lo sviluppo di una teoria del *feedback*, concepita per integrare quella astronomica. Egli aveva scoperto, tra l'altro, l'"effetto albedo", grazie al quale un'era glaciale, una volta incominciata, avrebbe finito per autoalimentarsi.

A causa delle incertezze in cui tale teoria astronomica si imbatté nel determinare la durata delle passate glaciazioni e dei suoi stessi limiti, specie nell'ipotizzare i fenomeni glaciali per un solo emisfero, essa, dopo la morte di Croll, venne in gran parte disattesa per almeno tre decenni. A sottoporre a revisione cri-

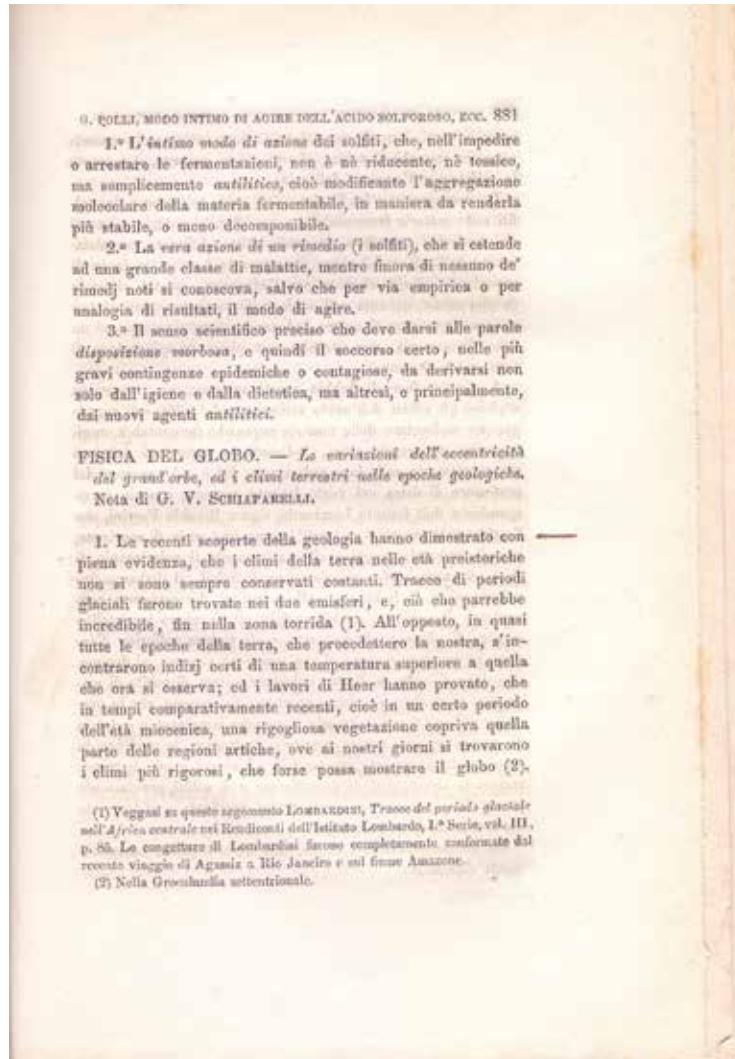


Fig. 8 – La nota dello Schiaparelli del 1868

tica rigorosa la teoria dello scienziato scozzese fu, tra i primi, il noto astronomo dell'Osservatorio di Brera, Giovanni Virginio Schiaparelli (1835-1910). Presso questo Osservatorio, tra il 1860 e il 1870, si era avviata una tradizione di studi e ricerche originali sui cambiamenti del clima, che nascevano dall'esigenza di indagare analiticamente le varie periodicità riscontrabili nell'avvicendamento dei fenomeni meteo-climatici. L'astronomo piemontese, nel suo lavoro critico sulla teoria del Croll, sosteneva che le temperature di un luogo qualsiasi della Terra non dipendono soltanto dall'irraggiamento solare in quel punto, dato che l'atmosfera e l'oceano agiscono come due "potentissimi moderatori" capaci di equilibrare, senza sosta, le temperature su tutta la superficie del globo (fig. 8). Alle latitudini intermedie di ogni emisfero, infatti, l'azione compensatrice degli oceani e dell'atmosfera riesce a ridurre le differenze dell'irraggiamento

solare a meno di un settimo del loro valore: ciò limiterebbe di molto l'influsso, ipotizzato dalla teoria di Croll. Pur supponendo che, a causa dell'accresciuta differenza tra l'irradiazione estiva e quella invernale, il clima possa peggiorare di tanto in un emisfero, Schiaparelli, consapevole del fatto che la somma del calore ricevuto dalla Terra si mantiene sempre costante, asseriva che, ad ogni abbassamento di temperatura in una data regione, doveva corrispondere un certo riscaldamento in un'altra. Se il contrasto climatico tra i due emisferi si accresce, con esso si intensificano anche le azioni compensatrici del mare e dell'atmosfera: le correnti e i venti, dovuti ai maggiori squilibri di temperatura, dovranno necessariamente diventare più potenti e trasportare, dunque, una maggior quantità di calore dall'emisfero temperato a quello freddo. In questo modo si ridurrebbe l'ipotizzata differenza climatica tra i due emisferi. Così Schiaparelli concludeva la sua nota critica: «*Le variazioni dell'eccentricità del grand'orbe non hanno potuto essere causa principale né dei periodi glaciali, né degli innalzamenti di temperatura, di cui la paleontologia dà testimonianza [...]; da quelle variazioni è impossibile ricavare alcun criterio per fissare la scala assoluta dalle epoche antistoriche della Terra*». Egli puntualizzava, infine, che, anche se variazioni nell'eccentricità dell'orbita possono aver innescato cambiamenti climatici, tra i due ordini di fenomeni, vi sarebbe una sorta di correlazione soltanto nella fase di inizio. Con questa sua conclusione, lo Schiaparelli lasciava intendere, senza approfondire la sua ipotesi, che altri fattori determinanti dovrebbero intervenire per produrre una vera glaciazione (Schiaparelli, 1868). All'Osservatorio di Brera operava anche Giovanni Celoria (1842-1920), di cui è molto apprezzata la memoria sul sincronismo tra le variazioni della temperatura e delle precipitazioni ed il periodo delle macchie solari (Celoria, 1873). In seguito, influenzato, forse, dal geologo Torquato Taramelli (1845-1922), il Celoria, si orientò verso uno studio dei cambiamenti del clima più storico e naturalistico.

Non riferita alla scala dei tempi geologici, bensì al riscaldamento climatico osservato alla metà dell'Ottocento, è, invece, l'originale ipotesi del geologo Antonio Stoppani (1824-1891). Più che all'aumento della temperatura, Stoppani riconduceva lo scioglimento ed il regresso dei ghiacciai ad una marcata riduzione della nevosità (fig. 9). Al riguardo, nella sua comunicazione *Sull'attuale regresso dei ghiacciai sulle Alpi*, presentata a Roma nel 1881, in occasione della seduta reale dell'Accademia dei Lincei, egli adduceva, come "testimonianza", il caso di Milano, dove, tra il 1797 e il 1806, il totale dei giorni con precipita-

zioni nevose era stato pari a 243 (in media 26 all'anno), mentre nel periodo dal 1857 al 1876 era stato 166, mediamente 8 giorni all'anno (Malaspina, 2007).

Le speculazioni teoriche sul cambiamento climatico

Nella panoramica internazionale degli studi storici e teorici legati al concetto di "cambiamento climatico", i lavori prodotti in Italia, fino a quasi tutto il secolo XIX, costituiscono dei veri e propri "prodromi" sull'argomento, ancorché ignoti alla maggior parte degli addetti ai lavori. Altre teorie, sviluppate nell'Ottocento per spiegare i mutamenti del clima, si fondano essenzialmente sugli effetti dell'irradiazione solare sulla Terra e sulla composizione dell'atmosfera.

La prima formulazione fisico-matematica moderna del concetto di calore è legata al nome di Jean-Baptiste Joseph de Fourier (1768-1830), il quale già all'inizio del XIX secolo, scoprì che l'atmosfera terrestre gioca un ruolo importantissimo nel determinare la temperatura del Pianeta, attraverso le sue componenti gassose. Egli la paragonò ad una sorta di serra che si lascia attraversare dalla radiazione solare, ma trattiene, invece, una parte del "calore oscuro" irradiato dalla Terra. Il riconoscimento della capacità degli strati atmosferici di assorbire la radiazione solare e trasformarla, almeno in parte, in calore, risale alla seconda metà del XVIII secolo e si deve al naturalista ginevrino Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799), ma, a quanto risulta, Fourier fu il primo scienziato ad alludere, in modo palese, al concetto di effetto serra (*effet de serre*). È pertanto a lui che se ne riconosce la paternità. Fourier così scriveva: «*Il problema delle temperature globali è uno dei più importanti e difficili di tutta la filosofia naturale. Si compone di elementi alquanto diversi che debbono essere considerati da un unico punto di vista generale [...]*» (Fourier, 1824). Gli attuali modelli del clima e dei suoi cambiamenti seguono esattamente il suo stesso approccio di base. In merito all'effetto serra atmosferico, Fourier non poté, in ogni caso, sviluppare calcoli precisi, a causa della mancanza dei dati fisici dell'interazione tra aria e radiazione solare sull'intero spettro. Non esitò però a rimarcare che «*i movimenti dell'aria e delle acque, l'estensione dei mari, l'elevazione e la forma del suolo, gli effetti dell'industria umana e tutti i cambiamenti accidentali della superficie terrestre influenzano le temperature di ogni clima*» [e che] «*la mobilità delle acque e dell'aria tende a moderare gli effetti del calore e del freddo*» (Fourier, 1827).

Qualche anno più tardi, il fisico Macedonio Melloni (1798-1854) condusse interessanti esperimenti sulla trasmissione del

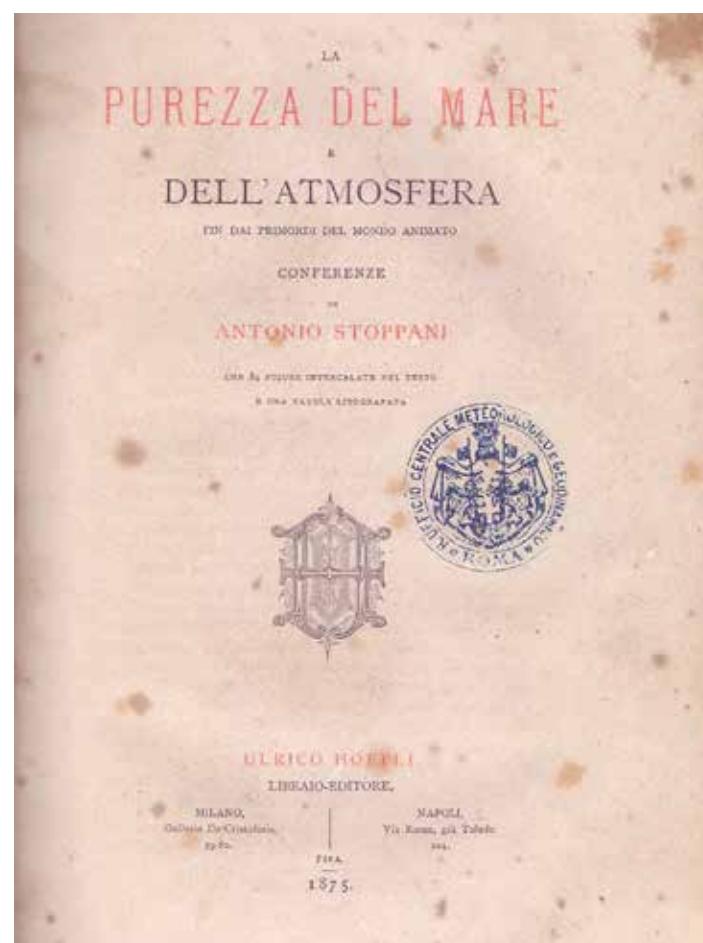


Fig. 9 – Il testo pubblicato dallo Stoppani nel 1875

"calore radiante" (raggi infrarossi) attraverso corpi solidi e liquidi (Melloni, 1833). A proposito di gas atmosferici, poi, egli ipotizzò che variazioni nel contenuto del vapore acqueo sarebbero capaci di alterare il potere assorbente dell'atmosfera verso la radiazione incidente. Al Melloni si deve anche la coniazione del vocabolo "diatermano", nell'accezione di "diafano" o trasparente al calore.

La scoperta dei cosiddetti gas serra era oramai prossima. Il merito spetta al fisico irlandese John Tyndall (1820-1893), il quale, nel 1859, nel presentare alla Royal Society i primi risultati dei suoi esperimenti spettrofotometrici con i gas atmosferici, faceva rilevare come "gas elementari", quali l'ossigeno, l'azoto e l'idrogeno risultassero quasi trasparenti al calore radiante e come, invece, molecole gassose "composte" quali il vapore acqueo, l'anidride carbonica e l'ozono fossero i migliori assorbitori e radiatori di calore. Il grande merito di Tyndall è l'aver dimostrato che il vapore acqueo è, tra i componenti dell'atmosfera, il più potente assorbitore e radiatore di calore e, dunque, il più importante gas che regola la temperatura della superficie ter-

restre. Il fisico irlandese scorse anche la possibilità di servirsi di questo effetto del vapore acqueo per spiegare i cambiamenti del clima terrestre e, in particolare, le ere glaciali appena scoperte e argomento di controversia tra gli scienziati. Egli individuò la causa della loro origine, appunto, nella diminuzione della quantità di vapore acqueo atmosferico (Tyndall, 1863).

Strumenti di indagine per la climatologia storica

Nel frattempo, la climatologia storica – intesa come disciplina volta alla ricostruzione del clima del passato sulla sola base delle evidenze documentarie e delle prime serie meteorologiche strumentali – aveva cominciato a svilupparsi in senso rigorosamente scientifico, grazie a una stimolante intuizione del fisico svizzero Louis Dufour (1832-1892) che utilizzò le date di inizio delle operazioni di vendemmia, “estraibili” dalle diverse fonti documentarie, ai fini della ricostruzione dell’andamento termico nel periodo pre-strumentale (Dufour, 1870). L’intuizione di Dufour ispirò il climatologo francese Alfred Angot (1848-1924) a realizzare, per la Francia, una sorta di “repertorio”, assai accurato, delle date di inizio della vendemmia (fenologia storica), attingendo dall’insieme delle testimonianze documentarie a lui note, di cui le più antiche risalgono al XIV secolo (Angot, 1885).

Nel nascente settore di indagine della climatologia storica si può annoverare anche Ferdinando Meucci (1823-1893), un altro studioso italiano che attese alle ricerche sull’evoluzione del sistema climatico. Il confronto che egli fece tra la serie più lunga delle temperature fiorentine seicentesche (1654-1670) e quella del periodo 1832-1871, rilevata all’Osservatorio Ximeniano, gli consentì, nel 1873, di escludere, al pari del Libri, cambiamenti climatici locali degni di nota (Cantù, 2004).

Se Dufour e Angot si erano serviti della fenologia storica per ricostruire il clima dei secoli passati, l’astronomo statunitense Andrew Ellicot Douglass (1865-1962), preferì avvalersi dei risultati della dendrocronologia, allo scopo di ricercare, nella sequenza degli anelli di crescita degli alberi, tracce del ciclo undecennale dell’attività delle macchie solari (Douglass, 1919), scoperto da Samuel Heinrich Schwabe (1789-1875), l’astronomo tedesco cui si devono le prime serie indagini scientifiche sull’argomento (Secchi, 1870).

Quasi contemporaneamente ad Angot, il geologo tedesco Eduard Bruckner (1862-1927) dell’Università di Berna analizzò, per molte regioni del Pianeta, sia le serie meteorologiche

strumentali disponibili, sia le varie annotazioni di rilevanza climatologica, dirette ed indirette, contenute nelle diverse fonti storiche, allo scopo di indagare tutte le possibili variazioni climatiche occorse, specie dal 1790 in poi, e di ricercarne la loro ciclicità prevalente. Da questo suo studio emerge l’esistenza di una periodicità media di trentacinque anni, oggi meglio identificata come “ciclo di Bruckner” (Bruckner, 1890).

Studi e teorie tra la fine dell’Ottocento e i primi del Novecento

Alla fine dell’Ottocento, le grandi glaciazioni del Quaternario erano state riconosciute ed i concetti di epoche glaciali ed interglaciali erano oggetto di acceso dibattito. Le grandi scoperte della geologia avevano dimostrato con piena evidenza che, nelle ere preistoriche, i climi della Terra non erano mai stati costanti; molti dei principali meccanismi alla base delle oscillazioni glaciali, e quindi del clima, erano stati scoperti, sebbene non ancora compresi del tutto. Tra essi sono da evidenziare le variazioni nell’intensità dell’irraggiamento solare, i cambiamenti nella trasparenza e nella composizione dell’atmosfera, le modificazioni nella distribuzione geografica delle terre e dei mari, il vulcanismo, l’orogenesi e l’epirogenesi. Nuove teorie sul clima erano state proposte ed importanti lavori realizzati su argomenti come il bilancio energetico ed il biossido di carbonio contenuto nell’atmosfera.

Nell’ultimo decennio del secolo XIX, il chimico fisico svedese Svante August Arrhenius (1859-1927) elaborava uno studio in cui, riferendosi all’ipotesi meteorologica fondata sulla trasparenza e composizione dell’atmosfera, sosteneva che una diminuzione o un aumento, nella misura di circa il 40%, del contenuto di un componente atmosferico minore, qual è l’anidride carbonica, avrebbe potuto innescare fenomeni di *feedback* capaci di provocare ere glaciali o periodi interglaciali. Sviluppando al riguardo un modello di bilancio energetico basato sugli effetti radiativi dell’anidride carbonica e del vapore acqueo, egli cercò di dare all’ipotizzato effetto serra una formulazione più rigorosa (Arrhenius, 1896). Sebbene Arrhenius rivolgesse la sua attenzione anche alla questione dell’incremento di origine antropica delle emissioni di CO₂, cimentandosi in laboriosi calcoli per determinarne gli effetti sulla temperatura atmosferica, il suo vero interesse per l’argomento muoveva dalla sola esigenza scientifica di scoprire la causa o le cause più probabili delle ere glaciali. Egli aveva anche previsto che l’inarrestabile sviluppo industriale avrebbe, in futuro, “positivamente” influenzato il



Fig. 10 - Il testo pubblicato dal De Marchi nel 1895

clima, in quanto l'aumento del contenuto di anidride carbonica atmosferica, avrebbe ulteriormente innalzato la temperatura dell'aria. Arrhenius era riuscito perfino a cogliere gli aspetti geo-economici positivi per le regioni più fredde del Pianeta (Behringer, 2013). Nel suo lavoro del 1896, egli riconosceva un merito speciale al geofisico italiano Luigi De Marchi (1857-1936). Quest'ultimo, l'anno precedente, aveva proposto un approccio particolarmente innovativo all'argomento (fig. 10), identificando in una diminuzione della trasparenza atmosferica, dovuta alla presenza di un maggior contenuto di vapore acqueo, la causa principale delle glaciazioni, e dunque delle variazioni climatiche in genere (De Marchi, 1895). In questo modo, De Marchi veniva a trovarsi in parziale contrasto con il modello teorico di Arrhenius, che attribuiva, invece, maggiore importanza alle variazioni dell'anidride carbonica. Secondo l'ipotesi del De Marchi, anch'essa di carattere meteorologico, un incremento del vapore acqueo, probabilmente dovuto ad una più intensa attività vulcanica, intorbidando l'atmosfera,

produrrebbe, per effetto del ruolo predominante svolto dal vapore acqueo nell'assorbimento della radiazione solare, un raffreddamento immediato su tutta la superficie terrestre, con conseguente aumento delle precipitazioni e dell'estensione dei ghiacci, specie nelle regioni continentali.

Sulla base delle acquisizioni scientifiche cui erano pervenuti Tyndall e Arrhenius, il geologo statunitense Thomas Chamberlin (1843-1928) ipotizzò che le variazioni del contenuto di anidride carbonica atmosferica ed i *feedback* del vapore acqueo sarebbero già di per sé sufficienti a rendere geologicamente ragione dei fenomeni climatici drastici connessi con le glaciazioni. Egli riconobbe la necessità di studiare le ere glaciali come una sequenza di episodi successivi, in accordo con le ipotesi di una loro origine astronomica. Chamberlin era convinto che la spiegazione dei mutamenti del clima avesse bisogno di un approccio nuovo di natura interdisciplinare, basato sulla formulazione di ipotesi di lavoro multiple, essendo la biosfera un sistema complesso, da collocare in una configurazione planetaria dinamica (Chamberlin, 1897). Nel concetto del ciclo geochimico del carbonio egli riconobbe il principale "agente" dei cambiamenti climatici, rimarcando il ruolo chiave svolto al riguardo dai processi diastrofici, attraverso il complesso delle deformazioni e dislocazioni meccaniche della crosta terrestre, l'innalzamento e l'erosione del suolo e le più importanti modificazioni nella circolazione oceanica ed atmosferica. Chamberlin si lamentava, però, di come non fosse rivolta la meritata attenzione al ruolo svolto dall'oceano come regolatore del ciclo geochimico del carbonio, in quanto importantissimo serbatoio di assorbimento della CO₂ (*carbon sink*). Questi ultimi aspetti della sua ricerca sono ancora attuali.

Agli inizi del XX secolo, gli studi e le ricerche sulle cause dei cambiamenti climatici seguivano filoni differenti. Dubbi sull'efficacia del biossido di carbonio come assorbitore della radiazione infrarossa del Pianeta, e quindi come responsabile principale dei cambiamenti del suo clima, incominciarono presto a diffondersi tra gli scienziati versati in tale genere di ricerche, così da tenere impegnati, per oltre un trentennio, perfino studiosi del calibro di Knut Johan Ångström (1857-1910), William Jackson Humphreys (1862-1949), Charles Greeley Abbot (1872-1973), George Clark Simpson (1878-1965). Il primo, noto fisico svedese, analizzando il comportamento dell'altro gas serra fondamentale, il vapore acqueo, giunse all'interessante conclusione che quest'ultimo gas e la CO₂ assorbono la radiazione infrarossa esattamente nelle stesse regioni o

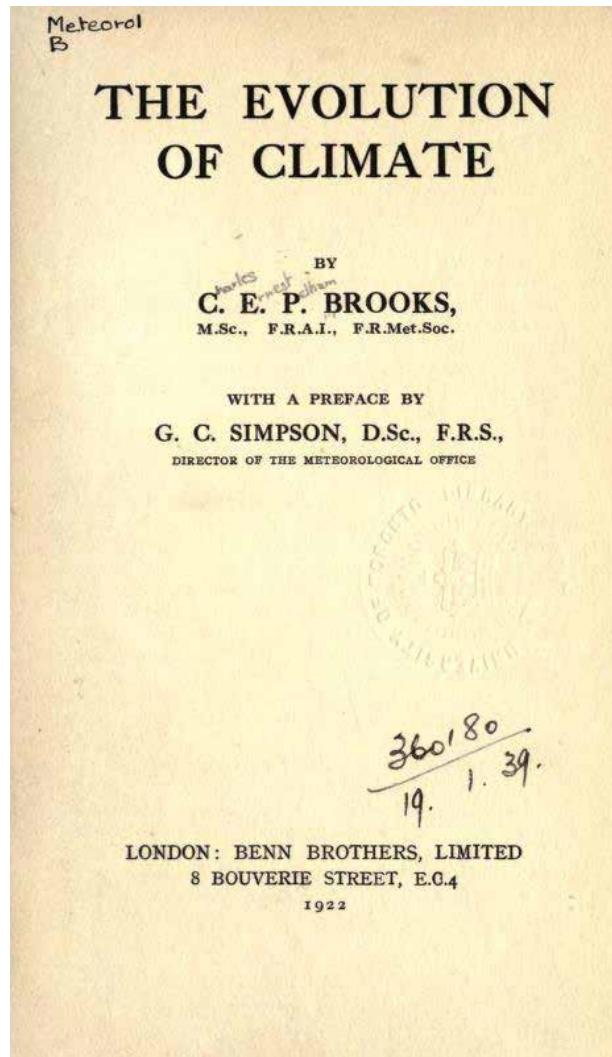


Fig.11 – Il testo pubblicato da Brooks nel 1922

bande dello spettro elettromagnetico. Di qui lo spunto che l'astrofisico statunitense Abbot ed il suo assistente, F. E. Fowle jr., trassero per riconoscere al vapore acqueo il ruolo di maggiore assorbitore della radiazione terrestre. Ai nomi dei meteorologi Humphreys e Simpson è legata l'ipotesi, piuttosto estrema, che le variazioni della CO_2 atmosferica, anche se di origine antropica, non avrebbero nessun effetto apprezzabile sui mutamenti del clima. La banda spettrale di assorbimento dell'anidride carbonica appariva, a Simpson, troppo ristretta rispetto alla regione di assorbimento del vapore acqueo. Inoltre, muovendo dal presupposto che l'atmosfera non potrebbe mai raggiungere uno stato di equilibrio radiativo, egli puntualizzava che sarebbe stato opportuno prendere in debita considerazione anche la convezione e gli altri moti atmosferici (Fleming, 1998).

La ricostruzione del clima del passato

Sempre agli inizi del XX secolo, i lavori di ricostruzione storica dell'evoluzione del clima terrestre si moltiplicavano e divenivano sempre più accurati. Nel campo di ricerca della climatologia storica, degno di una menzione è il fisico e climatologo Filippo Eredia (1877-1948), in forza, per circa un ventennio, presso il Regio Ufficio Centrale di Meteorologia e Geodinamica (l'antesignano dell'attuale Unità di Ricerca per la Climatologia e la Meteorologia applicate all'Agricoltura). Nell'ambito del X Congresso Internazionale di Geografia del 1913, l'Eredia, in qualità di responsabile della Sezione di climatologia di quell'Ufficio, presentò un'importante comunicazione sulle variazioni del clima in Italia (Eredia, 1913). In questo lavoro, che prende in esame le oscillazioni delle temperature rilevate nei principali osservatori della Penisola nel periodo 1866-1910, è possibile, tra l'altro, ravvisare anche l'avvio dell'odierna attività di ricerca in materia di cambiamenti climatici condotta su scala nazionale dall'Unità di Ricerca per la Climatologia e la Meteorologia applicate all'Agricoltura (CRA-CMA).

Nel secondo decennio del XX secolo, il meteorologo tedesco Gustav Hellmann (1854-1939) ed il climatologo inglese Charles Ernest Pelham Brooks (1888-1957), si distinsero per aver concepito originali lavori storici di sintesi sull'evoluzione del clima (Hellmann, 1921; Brooks, 1926). Il primo era già noto per i suoi studi accurati sulle origini storiche delle osservazioni e degli strumenti di meteorologia, mentre il secondo per la sua teoria che identificava la causa principale del cambiamento climatico (fig. 11) nelle variazioni che intervengono nella distribuzione delle terre e dei mari (Brooks, 1922).

Nello stesso decennio, anche il geografo ed esploratore statunitense Ellsworth Huntington (1876-1947), passato alla storia soprattutto per i suoi studi sul determinismo climatico, aveva dato grande impulso allo sviluppo moderno della climatologia storica, con un lavoro assai dibattuto (Huntington, 1917), in cui evidenziava come, a partire dal 450 a.C. e per circa due secoli, l'Italia avesse sperimentato condizioni climatiche assai favorevoli allo sviluppo delle attività umane, dell'agricoltura in special modo, tuttavia destinate a peggiorare nel periodo compreso tra il 250 e la fine del II secolo a.C.. A partire da quel momento, l'aridità sarebbe stata, per più secoli, l'aspetto climatico predominante in Italia, tanto da avere avuto, secondo l'autore, un ruolo determinante nel declino dell'agricoltura e nella con-

seguinte caduta dell'Impero Romano d'Occidente (476 d.C.). Dal 1919 in poi, Huntington, si avvale, quale climatologo storico, anche della nuova tecnica della dendrocronologia (Huntington, 1922).

Sempre nel secondo decennio del '900, il geofisico Francesco Vercelli (1883-1952) introdusse una tecnica per la ricerca delle possibili "periodicità" nell'andamento delle variabili meteo-climatiche. Egli l'aveva, però, originariamente concepita come una sorta di metodo di previsione "oggettiva" delle future oscillazioni della pressione atmosferica e dei conseguenti tipi di tempo (Vercelli, 1940). Questa tecnica, nota come analisi periodale o "cimanalisi", rappresenta uno dei pochi sviluppi autonomi italiani nel campo degli studi di meteorologia e climatologia. In materia di variazioni climatiche, l'analisi periodale venne impiegata, più in Italia che altrove, per ricercare cicli con periodo di qualche anno. Impressionante è il numero dei lavori di climatologia rigorosamente basati sull'analisi periodale, pubblicati a partire dal 1940. Tra gli studiosi più interessati alla nuova metodologia è da ricordare Silvio Polli (1904-1990), il quale, occupandosi delle applicazioni dell'analisi periodale a lunghe serie climatiche, mise in risalto, tra l'altro, l'esistenza, l'ampiezza e la realtà fisica di un'oscillazione climatica avente periodo medio di otto anni (Polli, 1950). Oltre che nell'andamento climatico e in altri elementi geofisici ed astronomici (numeri di Wolf delle macchie solari ed oscillazione del diametro del sole), il ciclo medio di otto anni era stato da lui scoperto nelle sequenze degli anelli di crescita degli alberi.

Il primo dopoguerra vide, in Italia, un prolungato sforzo dell'Eredia e del De Marchi, volto a rilanciare le ricerche sui cambiamenti del clima. È ragionevole considerarlo un impegno comune, giacché il De Marchi presiedeva la Sezione di meteorologia del Comitato Nazionale per la Geodesia e la Geofisica (nucleo originario del CNR), fin dalla sua fondazione (1920), mentre l'Eredia ne era stato nominato segretario, verso il 1923. Diversi sono gli studi realizzati, grazie al loro impulso, soprattutto negli anni Trenta. Al De Marchi si deve, inoltre, un'intensa attività di studi e ricerche, sia a livello nazionale che internazionale, sull'evoluzione storica del sistema climatico (De Marchi, 1928, 1930, 1931, 1936). Per sua iniziativa, infatti, il nascente Comitato Nazionale per la Geografia del CNR aveva avviato, agli inizi degli anni '30, un programma specifico di ricerca "sulle variazioni storiche del clima della Penisola", destinato a dar vita ad un'autorevole collana editoriale che porta il titolo *Ricerche sulle variazioni storiche del clima italiano*.

Un altro interessante lavoro sui cambiamenti del clima italia-

no, ancora una volta riconducibile all'impostazione metodologica di Luigi De Marchi, si deve al botanico e forestale Andrea Giacobbe (1891-1981), il quale, in un suo studio, raffronta, per 92 stazioni distribuite sul territorio nazionale, le temperature del periodo 1892-1906 con quelle dell'intervallo 1936-1955 (Giacobbe, 1961).

Contributi alla base del concetto di riscaldamento globale

Negli anni Venti, ecco riemergere dall'oblio la teoria astronomica di James Croll, per merito dell'ingegnere e matematico serbo Milutin Milanković (1879-1958), il quale, nel formulare la teoria matematica dell'irraggiamento, meglio nota come teoria dei movimenti ciclici della Terra, tenne debitamente conto delle revisioni critiche apportate, a suo tempo, dallo Schiaparelli. Secondo il suo modello teorico, la Terra non manterrebbe una posizione costante rispetto al Sole, a causa di tre fondamentali moti astronomici di periodicità millenaria: un ciclo di circa centomila anni dovuto alla variazione dell'*eccentricità dell'orbita planetaria*, un ciclo di quarantunomila anni circa, dovuto all'*oscillazione dell'inclinazione dell'asse*, detto *moto dell'asse terrestre* e un ciclo di ventiseimila anni circa, noto come *precessione degli equinozi*, connesso con il moto doppio conico compiuto dall'asse terrestre in senso orario. Egli ipotizzò che tali moti ciclici, noti appunto come "cicli di Milanković", influenzassero il clima, originando le sue principali fluttuazioni. Gli effetti combinati delle variazioni di questi tre moti millenari avrebbero dato luogo, nel corso del Quaternario, a glaciazioni, pressappoco ogni centomila anni (Milanković, 1920). In breve tempo, i climatologi riconobbero in questa teoria un contributo importantissimo allo studio dell'evoluzione quaternaria del clima della Terra. L'attività scientifica di Milanković si svolse anche nell'ambito del prestigioso gruppo di ricerca che vedeva la partecipazione del climatologo Wladimir Koeppen (1846-1940), autore di classificazioni climatiche tuttora in uso, di Rudolph Geiger (1894-1981), uno dei fondatori della micrometeorologia, e del geologo e meteorologo Alfred Wegener (1880-1930), "autore di quella teoria sulla deriva dei continenti che costituì un'ulteriore rivoluzione nel nostro modo di leggere il passato, anche climatico, del Pianeta" (Georgiadis e Mariani, 2006).

Circa un decennio più tardi, anche il concetto di "effetto serra" tornò ad essere studiato in modo accurato. A ridar credito alla teoria del cambiamento climatico antropogenico furono, da principio, l'ingegnere inglese Guy Stewart Callendar (1898-

1964) e, in seguito, il fisico canadese Gilbert Norman Plass (1920–2004). A loro è attribuita la paternità dell'ipotesi del riscaldamento globale antropogenico e delle prime proiezioni climatiche. Il principale contributo di Callendar riguarda lo sviluppo della teoria, nota appunto come "effetto Callendar", che, riallacciandosi al modello teorico proposto da Arrhenius, collega l'aumento della temperatura globale, allora osservato, all'incremento delle concentrazioni di anidride carbonica nell'atmosfera, derivante dall'utilizzo di combustibili fossili (Callendar, 1938).

Gli studiosi del clima del XX secolo avevano ormai a disposizione strumenti di analisi e di calcolo capaci di dare un forte impulso anche alle ricerche sui cambiamenti climatici. Le più recenti ed accurate misure spettroscopiche nelle bande di assorbimento del vapore acqueo, dell'anidride carbonica e dell'ozono, le nuove acquisizioni sul ciclo del carbonio e sulle emissioni industriali, nonché la possibilità di disporre dei primi calcolatori elettronici della storia, consentirono a Gilbert Norman Plass di costruire un modello numerico di trasferimento radiativo (principale e complesso meccanismo di scambio dell'energia tra i diversi strati dell'atmosfera e tra questa e la Terra). In questo modo, egli ottenne estrapolazioni ("predizioni") dell'incremento dei livelli globali di biossido di carbonio atmosferico, per la seconda metà del secolo, e dei conseguenti effetti sulla temperatura media planetaria (Plass, 1956).

Nel frattempo, un altro scienziato italiano, geologo di formazione, Cesare Emiliani (1922-1995), si distinse a livello internazionale, grazie al suo originale approccio metodologico in fatto di ricostruzione geologica dei climi del passato. Dal 1948 al 1956, egli rivolse i suoi studi e ricerche allo sviluppo di tecniche geochimiche originali per la misura della composizione isotopica del carbonio e dell'ossigeno nei gusci carbonatici di microfossili marini, i foraminiferi planctonici, riconoscendo nelle variazioni del rapporto tra gli isotopi un validissimo indicatore paleoclimatico. In particolare, egli diede avvio all'utilizzo della misura delle variazioni del rapporto isotopico tra ^{18}O ed ^{16}O , come indice delle fluttuazioni delle masse glaciali e delle paleotemperature, nel corso del recente passato geologico (Emiliani, 1955, 1966).

Tornando agli studi e ricerche sul riscaldamento globale, un'altra figura di spicco è stata Roger Randall Dougan Revelle (1909-1991), oceanografo e climatologo statunitense, il quale scoprì che la chimica dell'acqua marina impedirebbe il rapido assorbimento della CO_2 atmosferica in eccesso; il ritmo di as-

sorbimento del gas carbonico da parte degli oceani sarebbe, per Revelle, dunque, molto più lento di quanto precedentemente ipotizzato da molti scienziati (soprattutto geologi). Ciò lo porterà a concludere che le emissioni antropiche di gas serra potrebbero causare, nel corso del tempo, un riscaldamento globale del Pianeta, con tutto il suo carico di effetti ambientali, sociali ed economici. I risultati dell'importante scoperta di Revelle sono descritti in un lavoro realizzato in collaborazione con Hans Eduard Suess (1909-1993), un chimico fisico di origine austriaca (Revelle and Suess, 1957).

In quegli stessi anni, il geochimico americano Charles David Keeling (1928-2005), già collaboratore di Revelle, si impegnò attivamente in misure sistematiche dell'anidride carbonica, installando, nel 1957, sul massiccio vulcanico del Mauna Loa, nelle Hawaii, uno spettrofotometro. Il sito è posto nel cuore dell'Oceano Pacifico e ben si presta a questo genere di indagini; esso rappresenta il primo punto di misurazione del biossido di carbonio al mondo. Il programma di monitoraggio della CO_2 al Mauna Loa prosegue ancora oggi, cosicché disponiamo della curva a denti di sega, nota ai più come "curva di Keeling", che mostra l'aumento costante dei tassi di CO_2 atmosferica, con tutte le sue oscillazioni cicliche, fino ai giorni nostri (Hollar, 2013).

Nel 1967, il meteorologo e climatologo giapponese Syukuro Manabe (1931-) ed il climatologo statunitense Richard Tryon Wetherald (1936-2011) elaborarono un modello convettivo-radiativo unidimensionale che, al raddoppio del contenuto di CO_2 nell'aria, prevedeva l'aumento di $2,0\text{ }^\circ\text{C}$ della temperatura media atmosferica: si tratta, in assoluto, della prima previsione numerica del riscaldamento globale elaborata al calcolatore (Manabe e Wetherald, 1967). A partire dal 1969, inoltre, Manabe, in collaborazione con l'oceanografo americano Kirk Bryan (1929 -), realizzò le prime simulazioni numeriche del clima e delle sue variazioni sulla base di modelli accoppiati oceano-atmosfera (Manabe and Bryan, 1969).

I contributi allo studio dei cambiamenti climatici di Callendar, Plass, Revelle, Suess, Keeling, Manabe, Wetherald e Bryan contengono, tutti, il presupposto fondamentale per riconoscere in queste autorevoli personalità scientifiche i veri "padri" della teoria del riscaldamento globale (*Global Warming*).

La cooperazione e l'interdisciplinarietà

Con il moltiplicarsi degli studi e delle indagini specialistiche, si rendeva sempre più necessario avviare, su scala mondiale, un

coordinato lavoro di ricerca per acquisire nuove conoscenze sulle proprietà fisiche e chimiche della Terra e sulle interazioni tra il Sole e il nostro pianeta; occorre, inoltre, adottare un approccio interdisciplinare per studiare, a livello globale, i diversi aspetti del clima e dei suoi mutamenti. Con molta probabilità, il primo tentativo di discutere, a scala veramente planetaria, la questione dei cambiamenti del clima fu compiuto, per impulso di Luigi De Marchi, nell'ambito del Congresso Geografico Internazionale di Varsavia, che risale al 1934. Negli anni successivi, numerosi furono gli incontri internazionali in cui il tema dei cambiamenti climatici venne largamente dibattuto, sebbene soltanto alcuni sortirono risultati veramente degni di nota.

Se fino alla metà degli anni Cinquanta, le conquiste teoriche e gli studi di ricostruzione storica legati al concetto di "cambiamento climatico" apparivano fondamentalmente riconducibili all'attività di ricerca separatamente svolta da singoli studiosi, in meno di un lustro il nuovo approccio allo studio dei cambiamenti del clima incominciò a mostrare la prerogativa di sistematicità e globalità che oggi lo contraddistinguono.

L'impulso all'affermazione di questo nuovo orientamento veniva dall'Agenzia specializzata dell'ONU, l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM - WMO). Essa, nata con lo scopo di coordinare, regolamentare, armonizzare e condividere le attività di monitoraggio meteorologico e i risultati degli studi e ricerche sul clima e sui suoi cambiamenti, diede avvio ad una serie di incontri finalizzati a incoraggiare lo scambio di conoscenze e favorire la collaborazione scientifica tra i diversi Paesi. Fin dalla sua costituzione formale (1951), l'OMM rivolse il suo interesse allo studio sistematico e globale dei cambiamenti climatici; con l'Anno Geofisico Internazionale (AGI), i cui lavori si svolsero dal 1° luglio 1957 al 31 dicembre 1958, essa diede operativamente inizio alla cooperazione internazionale su queste tematiche. A tal proposito, all'interno dell'OMM, era stata nominata una commissione per la climatologia (Commission for Climatology), che, nel corso della sua terza sessione, provvide alla creazione di un gruppo di lavoro per lo studio delle fluttuazioni climatiche (Working Group on Climatic Fluctuations), ufficialmente istituito nel 1963. Il gruppo era composto da sette esperti di fama internazionale: l'americano John Murray Mitchell Jr. (1928-1990), che ne era a capo, il russo B. Dzerdzeevskii, il tedesco Hermann Flohn, il sudafricano W. L. Hofmeyr, l'inglese Hubert Horace Lamb, l'indiano K. N. Rao e lo svedese Carl Christian Wallén (WMO, 1966). L'eccellente attività di studio svolta da questo gruppo di lavoro si configura, storicamente, come la fondamentale premessa degli sviluppi organizza-

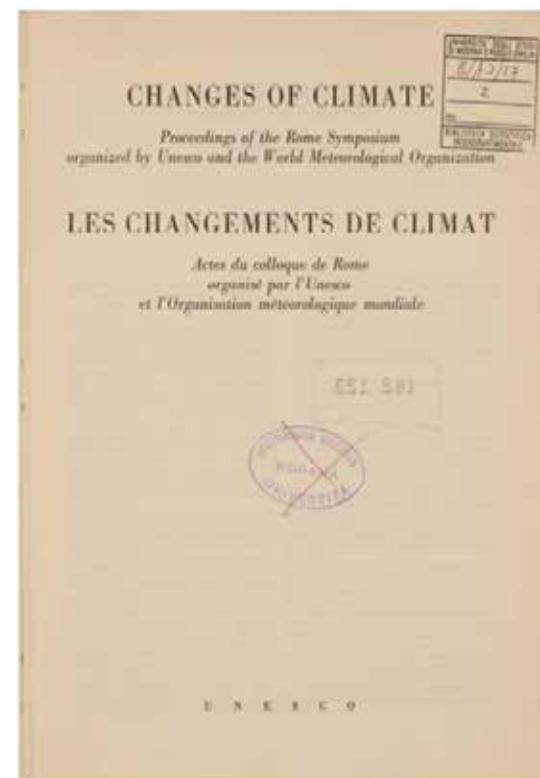


Fig.12 – Atti del simposio di Roma

tivi e scientifici che si andarono a delineare negli anni successivi.

A seguito del nuovo indirizzo di ricerca intrapreso, l'OMM, insieme con l'UNESCO, organizzò, a Roma, dal 2 al 7 ottobre 1961, presso la sede della FAO, il primo simposio ufficiale internazionale sui cambiamenti climatici. Erano presenti circa 115 scienziati di diversa formazione e specializzazione (meteorologi, oceanografi, geomorfologi, geografi, idrologi, botanici, geologi ed archeologi), provenienti da ben 36 Paesi. La conferenza di Roma ebbe il merito di coinvolgere, per la prima volta nella storia, i servizi meteorologici nazionali e di inserire nell'elenco delle loro attività istituzionali studi e ricerche che, fino ad allora, essi consideravano poco più che una mera curiosità erudita (fig. 12).

È da sottolineare che il simposio era stato preceduto da un'inchiesta dell'OMM sugli studi, pubblicati e inediti, svolti in materia di fluttuazioni climatiche, nell'ambito dei paesi membri, i cui risultati sono disponibili sotto forma di repertorio bibliografico (WMO, 1961). Il volume che raccoglie i diversi interventi presentati al simposio di Roma dà anche spazio a numerosi riferimenti bibliografici relativi alle variazioni climatiche degli ultimi cento anni e a scritti che contengono spunti scientifici ancora di grande attualità (WMO, 1963). Fra tutti i contributi presentati ve

ne sono tre che, per ragioni particolari, meritano una menzione a parte. Ne sono rispettivamente autori i meteorologi Ezio Rosini, Hubert Horace Lamb e Edward Norton Lorenz.

Ezio Rosini (1914-2002), allievo di Enrico Fermi e dal 1970 al 1979 direttore dell'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (attuale CRA-CMA), era, agli inizi degli anni Sessanta, una personalità di spicco della moderna climatologia italiana. Molti erano i meriti che egli poteva vantare nel settore, come, ad esempio, per citarne uno dei più importanti, quello di aver dotato il Servizio Meteorologico dell'AM di un moderno centro di calcolo automatico per l'elaborazione dei dati meteo-climatici (1950): il primo in Italia destinato ad uso climatologico, oltre che uno dei primi al mondo (Vento, 2002). Chiamato a rappresentare l'Italia, Rosini presentò un interessante studio sulla definizione quantitativa dei concetti di costanza e stabilità del clima (*A quantitative definition of the meaning of constancy and steadiness of climate*), il cui scopo era di contribuire alla messa a punto di un criterio generale per definire, sulla base dell'analisi sequenziale di serie regolari di osservazioni meteorologiche, l'esistenza o meno di un cambiamento climatico. Rosini proponeva di fondare la definizione di tale criterio sui concetti statistici di "indice di incostanza" ed "indice di stabilità".

Il climatologo inglese Hubert Horace Lamb (1913-1997) presentò uno studio volto all'analisi approfondita delle fasi climatiche storiche più significative già identificate dalla scienza, quali l'Optimum Climatico Postglaciale (periodo straordinariamente caldo culminante all'incirca tra il 5000 ed il 3000 a.C.), l'epoca fredda della prima Età del Ferro (circa 900-450 a.C.), il periodo caldo dell'epoca medievale (circa 1000-1200), la Piccola Età Glaciale (fase di freddo intenso collocabile tra il 1430 ed il 1850 all'incirca). Due aspetti del lavoro di Lamb appaiono particolarmente interessanti: lo sforzo di quantificare, per mezzo di indici (*winter severity index* e *summer wetness index*), le informazioni sul rigore degli inverni e sull'umidità delle estati, attinte dalle fonti storiche, evidenze documentarie in primo luogo, ed il tentativo di correlare le diverse fasi climatiche con i periodi di maggiore o minore intensità della circolazione generale dell'atmosfera. A Lamb, grande esperto di cambiamenti climatici e storia del clima, si deve il ponderoso trattato, in due volumi, intitolato *Climate: Present, Past and Future*, che può considerarsi come una sorta di "summa" delle cognizioni acquisite nel dominio della climatologia e degli studi sui cambiamenti del clima.

Infine, lo scienziato americano Edward Northon Lorenz (1917-2008) partecipò al meeting di Roma del 1961 con un in-

teressante studio sull'influenza delle variazioni del gradiente termico verticale (concetto di stabilità) sulle circolazioni monsoniche e zonali, realizzato, in collaborazione con il meteorologo ed oceanografo Eric Bradshaw Kraus, con l'impiego di un modello matematico dell'atmosfera sviluppato su un computer ancora rudimentale, il Royal-McBee LGP-30. In questo lavoro si intravede il germe della sua teoria del caos deterministico, formulata, l'anno seguente, nella sua versione originaria ed originale (Lorenz, 1963). Di Lorenz è famoso il modello teorico fluidodinamico tridimensionale fondato sul concetto di "elevata sensibilità" di un sistema fisico complesso, qual è anche l'atmosfera, alle condizioni iniziali delle sue stesse variabili. Il set di equazioni che simula il comportamento futuro del sistema dà, come risultato, una sequenza infinita di soluzioni estremamente complesse, fortemente dipendenti dai dati iniziali. Ne consegue che la benché minima variazione dei dati di input finisce per condizionare notevolmente il risultato finale, rendendo così inattendibile ogni previsione meteorologica con validità superiore ai dieci – quindici giorni. Il modello fu da lui presentato, nel 1979, all'American Association for the Advancement of Sciences, in una comunicazione dal titolo figurato e provocatorio: «Può il battito delle ali di una farfalla in Brasile scatenare un tornado in Texas?».

Al simposio di Roma seguì, a meno di un anno, un altro convegno internazionale sui cambiamenti climatici: l'incontro di Aspen (Colorado) che si tenne dal 16 al 24 giugno 1962. Ad organizzarlo fu la nascente Commissione di Paleoclimatologia del Consiglio nazionale delle ricerche statunitense. Il ristretto ma qualificato gruppo di studiosi che animò la conferenza presentò lavori di ricostruzione storica del clima unicamente incentrati sui secoli XI e XVI, in quanto considerati l'uno il più caldo e l'altro il più freddo. Uno dei meriti più grandi della conferenza è di aver coinvolto e fatto interagire studiosi internazionali di settori disciplinari differenti: geologi, glaciologi, meteorologi, dendrocronologi e storici. Si scelse di rappresentare, su diagrammi omogenei, le informazioni climatiche raccolte dalle diverse categorie di studiosi. Furono realizzati ventidue diagrammi per il secolo XI e trentaquattro per il XVI, noti come "diagrammi di Aspen" e sembra siano serviti a fugare il timore nascosto che i risultati ottenuti da discipline differenti fossero tra loro "incompatibili". Ma l'aspetto che più contraddistinse il meeting fu l'apertura della paleoclimatologia alla storia. Cosicché, grazie ai validi apporti degli storici intervenuti, quel convegno diede un impulso significativo all'affermarsi della "climatologia storica". Determinante, in tal senso, fu il ruolo svolto

dallo storico francese Emmanuel Le Roy Ladurie (1929-), che si era distinto fra tutti gli altri presenti, per le sue idee innovative sull'argomento. A lui si deve la pubblicazione, nella rivista *Annales: Économies, Sociétés, Civilisations*, di una serie di articoli originali dedicati alla storia del clima, che precedono il suo lavoro più importante (Le Roy Ladurie, 1967). L'autore non si limita soltanto a descrivere, in modo sistematico, le variazioni del clima registrate in Europa, durante l'ultimo millennio (dal XIII al XX secolo, in particolare), ma addirittura le documenta con prove accurate, ricavate da cronache, documenti e testi di età medievale e moderna, analizzati criticamente. Tra le evidenze storiche su cui il testo si basa, le notizie relative alle date di inizio della vendemmia costituiscono degli indicatori, più che affidabili, delle oscillazioni climatiche del millennio in esame. L'opera di Le Roy Ladurie riscosse un successo enorme, tale da "sancire", in maniera definitiva, la presenza autorevole dello storico, quindi di un umanista, in questo genere di ricerche.

Alle iniziative congressuali di Roma ed Aspen (pietre miliari per l'avanzamento degli studi sulle variazioni del clima) è, con ogni probabilità, legato il tentativo dell'OMM di unificare la terminologia utilizzata nel trattare la complessa questione dei cambiamenti climatici. Il risultato finale di questo singolare sforzo è la "nomenclatura", elaborata a cura del Working Group on Climatic Fluctuations, proposta in un capitolo della Nota Tecnica n. 79 dell'OMM. Di seguito, si riportano alcuni esempi: "cambiamento climatico" è il termine più generale; "fluttuazione" è ogni cambiamento con qualche carattere di sistematicità, comprendente almeno un minimo tra due massimi o un massimo tra due minimi; "variazione" è un cambiamento a scala temporale abbastanza grande da comportare medie diverse per trentenni successivi; "tendenza" è una variazione monotona con un minimo, ad un estremo dell'intervallo considerato, ed un massimo, all'altro; "ritmo" è una periodicità alquanto grossolana. Si definisce "oscillazione" il movimento di una variabile tra massimi e minimi successivi. Nella "vacillazione", infine, i valori della variabile, per un intervallo di tempo, si raggruppano intorno ad una media (o altro indice di media), successivamente, dopo una transizione piuttosto rapida, si attestano intorno ad una nuova media, e così via, non escludendo, però, il ritorno alla media primitiva ed una certa regolarità nel "saltare" da una media all'altra (WMO, 1966).

Gli studi e le attività recenti

A livello nazionale, dagli anni '50 in poi, l'impegno dei cli-

matologi in materia di cambiamenti del clima si mantenne vivo grazie soprattutto agli studi condotti nell'ambito del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare. Sono da ricordare: il tentativo di spiegare le variazioni climatiche progressive chiamando in causa le "fluttuazioni secolari dei grandi centri d'azione dell'atmosfera" (Castriota, 1948); un breve ma completo lavoro sull'aumento della temperatura della Terra, che dà conto delle prove geografico-fisiche, biologiche e meteorologiche del riscaldamento planetario in atto fino agli anni Quaranta (Bilancini, 1950); l'analisi statistica dei valori medi estivi della temperatura di Milano degli ultimi 118 anni (Todaro, 1964), di cui l'estrapolazione del trend per il cinquantennio successivo rappresenta una delle ventiquattro "previsioni climatiche a fondamento scientifico" citate da Lamb (Lamb, 1977).

Altri originali lavori riguardano il tentativo di valorizzare diverse serie climatiche ultraottantennali, utili per la ricostruzione delle variazioni del clima accadute nel periodo coperto dalle misure strumentali (Cantù e Narducci, 1967); le considerazioni sulle cause dei cambiamenti climatici degli ultimi decenni, alla luce della necessità di approfondire le conoscenze sui meccanismi d'interazione tra il mare e l'atmosfera (Gazzola, 1968); uno studio, infine, che rimarca il ruolo svolto dal biossido di carbonio atmosferico nel produrre cambiamenti climatici a scala globale (Ruggeri, 1983).

Tuttavia, ad imporre lo studio delle variazioni climatiche all'attenzione della comunità scientifica nazionale è stato soprattutto un geografo, Mario Pinna (1923-2001), a partire dallo scritto *Le variazioni del clima in epoca storica ...*, in cui si sforzava di fornire un quadro, il più preciso possibile, delle oscillazioni climatiche succedutesi pressappoco dal 400-500 a.C. agli anni '60 del secolo scorso (Pinna, 1969). Negli anni Settanta, il mondo accademico italiano rivolgeva un interesse particolare anche alla paleoclimatologia, su impulso soprattutto del geologo Giuseppe Orombelli. Egli, sosteneva, tra l'altro, quanto le evidenze palinologiche e dendroclimatologiche fossero utili per lo studio delle variazioni climatiche del Quaternario (Orombelli, 1982).

Mentre in Italia gli sforzi erano principalmente rivolti all'analisi delle serie storiche strumentali, all'estero si moltiplicavano i tentativi di studiare le variazioni del clima attraverso il monitoraggio continuo e l'approccio sistemico - modellistico. Nel 1971, per iniziativa del climatologo russo Mikhail Ivanovich Budyko (1920-2001), a cui si deve la trasformazione della climatologia da disciplina qualitativa a scienza puramente quan-

titativa (Budyko, 1958), si svolse a Leningrado una Conferenza sulla Climatologia fisica e dinamica, formalmente organizzata dall'OMM e dall'Associazione Internazionale di Meteorologia e Fisica dell'Atmosfera, destinata anche alla trattazione del discusso problema dei cambiamenti climatici. Gli Atti furono pubblicati nel 1974, con il titolo *Physical and Dynamical Climatology*. La Conferenza, che servì soprattutto a proporre e lanciare la Climatologia come scienza del complesso sistema climatico (alla luce della teoria generale dei sistemi, da poco adottata), si articolava anche in una sezione intitolata "Fluttuazioni e modificazioni climatiche", in cui comunicazioni che trattavano l'argomento secondo le moderne vedute erano alternate ad altre di impostazione più tradizionale.

Per quanto la cosa possa apparire strana, negli anni '60 e '70 dello secolo scorso si temeva più un raffreddamento che un riscaldamento globale del Pianeta. Dopo il 1940, infatti, l'aumento delle temperature terrestri, iniziato nella seconda metà dell'Ottocento, si era arrestato ed aveva ceduto il passo ad un processo inverso. Da quel momento, per circa un trentennio, le temperature non hanno mai cessato di diminuire. A tal proposito, occorre sottolineare che tanto il raffreddamento quanto il riscaldamento della Terra erano principalmente imputati all'attività dell'uomo. Le preoccupazioni degli scienziati per il cambiamento climatico allora in atto e le inevitabili inquietudini diffuse nella società avevano spinto l'OMM ad organizzare, nel febbraio 1979 a Ginevra, la prima Conferenza mondiale sul clima, allo scopo di prendere seriamente in esame la dibattuta questione dei cambiamenti climatici, soprattutto antropogenici, e giungere all'adozione di un Programma mondiale di ricerca sul clima (WCRP).

Sempre nel 1979, dagli Stati Uniti d'America, la National Academy of Sciences, basandosi sul consenso, sempre più diffuso tra gli scienziati, intorno al fatto che il rischio climatico maggiore fosse rappresentato dal riscaldamento globale (*Global Warming*), valutò plausibile stimare che un raddoppio del contenuto di CO₂ atmosferica avrebbe potuto provocare un aumento di temperatura compreso tra 1,5 e 4,5 °C.

Nonostante l'OMM fosse sempre più impegnata in programmi connessi con i cambiamenti climatici, si dovette tuttavia attendere il 1988 perché, per impulso della Conferenza internazionale sul clima di Toronto e su incarico dell'ONU, un accordo tra l'OMM e il Programma delle Nazioni Unite sull'Ambiente (UNEP) desse formalmente vita ad un comitato intergovernativo di "esperti" in materia di evoluzione del clima, ben

noto come IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): un organismo istituito allo scopo di fornire ai governi di tutto il mondo una visione globale dello stato delle conoscenze sul cambiamento climatico e sui suoi potenziali impatti ambientali e socio-economici. Il compito dell'IPCC, la cui sede è a Ginevra, non è quello di svolgere attività di ricerca sul clima e sui relativi cambiamenti, né di controllare i dati meteo-climatici disponibili, bensì di redigere, ogni cinque anni, un rapporto esaustivo, trasparente, imparziale e su cui ci sia largo consenso, sui progressi della climatologia e sullo stato delle conoscenze relative all'impatto delle attività umane sul clima. In altri termini, questo gruppo di esperti si limita semplicemente a passare in rassegna e valutare le più recenti informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche prodotte a livello mondiale, per una maggiore comprensione dei cambiamenti climatici (WMO, 1991).

In conclusione, il concetto di "cambiamento climatico" è antico: l'uomo ha sempre avuto la percezione dell'incessante incostanza del clima, fin dalla più remota antichità. L'avvento della scienza moderna, tuttavia, ha fornito strumenti e sviluppato conoscenze utili allo studio del fenomeno dei cambiamenti climatici, che ha potuto così essere indagato e spiegato, attraverso la formulazione di ipotesi, teorie e, infine, modelli fisico-matematici per prevederli. Occorre rilevare, infine, che, se è vero che gli stimoli maggiori all'avanzamento degli studi e ricerche in materia sono venuti da studiosi di Paesi stranieri, è comunque innegabile che la partecipazione degli scienziati italiani al dibattito scientifico internazionale si è rivelata assai proficua e foriera di originali ed interessanti spunti di riflessione.

Ricostruzione delle variabili meteorologiche al suolo

Tutte le elaborazioni presentate nell'atlante si basano su variabili meteorologiche giornaliere ricostruite su una griglia regolare georiferita a partire da informazioni di natura puntuale acquisite dalle reti di monitoraggio meteorologico italiane e presenti nella Banca Dati Agrometeorologica Nazionale (BDAN) del Sian del Mipaaf.

I dati sono stati trattati secondo gli standard definiti dall'OMM per le elaborazioni statistiche climatiche, che fissano una soglia minima di lunghezza delle serie storiche meteorologiche per la loro stima. Tuttavia, data l'intrinseca complessità del sistema atmosfera-superficie terrestre, non si ritiene sufficiente il semplice trattamento statistico delle serie storiche, limitato ai singoli siti geografici (stazioni di rilevamento), per rappresentare il comportamento medio di grandezze di stato che variano notevolmente alle differenti scale spazio-temporali osservabili.

La regionalizzazione del clima italiano risulta evidente dalle statistiche geografiche 1971-2000 delle due più comuni grandezze meteorologiche riferite a 8 macrozone del territorio nazionale. La temperatura media annuale italiana decresce con la latitudine mentre è inversa la tendenza geografica delle precipitazioni, la cui media climatica annuale decresce da Nord a Sud; la precipitazione climatica annuale della Sicilia e della Sardegna è circa il 60% della precipitazione climatica annuale del Nord Italia (tab. I). All'interno delle suddette macrozone, gli eventi meteorologici presentano una fenomenologia che dipende sostanzialmente da fattori stabili rispetto al periodo medio di evoluzione dei fenomeni atmosferici, quali, per esempio, il rilievo orografico, la distanza dal mare o dai grandi bacini idrici e la copertura del suolo. Questi fattori determinano variazioni locali di tipo sistematico del segnale meteorologico che portano a ulteriori zonazioni climatiche osservabili alle differenti scale spaziali risolte dalle reti di monitoraggio meteorologico.

Tabella I – Medie climatiche annuali del territorio italiano (1971-2000)

Zona Geografica	Temperatura media (°C)	Temperatura minima (°C)	Temperatura massima (°C)	Precipitazione totale (mm)
Nord Ovest	8,7	4,1	13,3	939,8
Nord Est	9,4	4,9	13,8	927,9
Centro Tirreno	13,7	8,7	18,7	812,5
Centro Adriatico	12,8	8,1	17,5	761,3
Sud Tirreno	15,7	11,5	19,8	803,2
Sud Adriatico	15,7	11,1	20,2	597,7
Sicilia	17,4	13,3	21,5	598,5
Sardegna	16,2	11,6	20,7	504,6
ITALIA	13,2	8,7	17,7	765,3

(Osservatorio Agroclimatico Sian - www.politicheagricole.it/)

Il calcolo delle statistiche climatiche deve, pertanto, considerare la dimensione geografica, attraverso un'analisi spazio-temporale delle serie storiche meteorologiche puntuali, per individuare le geometrie spaziali delle differenti componenti che costituiscono il segnale meteorologico. Ciò implica la formulazione di una corretta ed efficiente metodologia numerica per la ricostruzione delle variabili meteorologiche su griglie georiferite aventi una dimensione delle unità areali adeguata alla distanza media tra le stazioni di rilevamento della rete di monitoraggio (densità di campionamento).

In particolare, per le grandezze considerate dall'atlante, temperatura minima e massima giornaliere, umidità relativa media notturna e diurna e precipitazioni totali giornaliere, la ricostruzione sulle unità areali di griglia è avvenuta applicando opportuni stimatori geostatistici.

L'indeterminatezza di stima delle variabili meteorologiche

Le grandezze meteorologiche al suolo sono conosciute con buona precisione solo nei siti d'osservazione del sistema atmosfera-superficie terrestre (stazioni di rilevamento). Negli altri siti geografici il loro valore può essere stimato con metodologie di calcolo impostate sulla simulazione numerica della dinamica atmosferica o sull'inferenza statistica delle variazioni meteorologiche spazio-temporali. In entrambe le metodologie di stima (deterministica e probabilistica) il risultato è sempre affetto da un errore, la cui ampiezza, scostamento tra il dato calcolato e il dato reale, non è la stessa in tutti i siti o nei differenti intervalli temporali ma è tanto maggiore quanto maggiore è la variabilità meteorologica.

L'indeterminatezza della stima è causata dalla sistematica assenza d'informazione, soprattutto alle scale spaziali minori, sia nelle simulazioni numeriche degli eventi meteorologici sia nelle reti di monitoraggio. Così, mentre le tendenze meteorologiche sinottiche di un territorio sono rilevate dalle reti di monitoraggio e ben rappresentate nelle simulazioni numeriche, eseguite con modelli fisici dell'atmosfera, le variazioni meteorologiche locali sfuggono completamente alle reti di monitoraggio, la cui distanza minima tra le stazioni è dell'ordine della decina di chilometri; e non sono trattate o sono fortemente sottostimate dalle simulazioni numeriche, nelle quali la dinamica dell'at-

mosfera e la descrizione dei fenomeni meteorologici sono schematizzate da un numero finito di equazioni e ricostruite su griglie tridimensionali aventi la dimensione orizzontale di analisi dell'ordine di alcuni chilometri.

Il calcolo dell'errore di stima di una variabile geografica riferita a eventi unici non ripetibili, quali gli eventi meteorologici, richiede un'appropriata rappresentazione funzionale per derivare dai dati esistenti il modello delle variazioni spazio-temporali alle differenti scale d'osservazione (Matheron, 1989). Si è scelto di riferire l'errore di stima alle variazioni meteorologiche non ricostruibili con i modelli numerici e impostare l'analisi delle variabili sull'entità fisica "residuo meteorologico": differenza tra il segnale meteorologico e gli stati fisici calcolati con un modello del sistema atmosfera-superficie terrestre. Inoltre, poiché per il monitoraggio dello strato di atmosfera a contatto della superficie terrestre le stime sono in genere eseguite indipendentemente per singolo intervallo temporale, ne consegue che la variabilità meteorologica è calcolata sulle differenze $Q(d)$ tra i "residui meteorologici" associati alle coppie di punti di distanza vettoriale "d".

Le differenze $Q(d)$ sono utilizzate per modellare le curve che associano a ogni distanza vettoriale la media delle differenze al quadrato tra i "residui meteorologici" (semivariogramma). Delle curve sono calcolati sperimentalmente i soli punti relativi alle distanze vettoriali compatibili con la geometria della rete di monitoraggio. Le curve sono poi modellate da una funzione analitica che segue l'andamento dei punti sperimentali ed estende la traccia fino alla distanza nulla (modello di semivariogramma). Per le distanze inferiori alla distanza minima tra le stazioni di monitoraggio, le variazioni spaziali sono ipotizzate non crescenti e comprese tra l'ovvia differenza riscontrabile in tutte le variabili fisiche su distanza nulla (in ogni punto le variabili meteorologiche assumono un solo valore) e i punti delle curve calcolati per le classi di distanza compatibili con la geometria della rete di monitoraggio.

La conoscenza del modello di semivariogramma $\gamma(t,d)$ di una variabile meteorologica nell'intervallo di coordinata tempo "t" permette di calcolare la media delle variazioni al quadrato del "residuo meteorologico" della stessa variabile all'interno di una qualsiasi zona di territorio $v(x)$ centrata nel punto di coordinata spaziale "x": $D^2(t,v(x)) = 1/v^2(x) \int_{w \in v(x)} \int_{u \in v(x)} \gamma(t,|u-w|) du dw$; dove $D^2(t,v(x))$ è la varianza di dispersione locale e coincide con la varianza dell'errore di stima commesso se al punto di

coordinata spaziale "x" viene assegnato il valore o il residuo della variabile meteorologica rilevato da una stazione posizionata casualmente nella zona geografica $v(x)$. Più in generale, la varianza dell'errore di stima è proporzionale alla varianza di dispersione locale della variabile meteorologica ed è modulata localmente dal numero e dalla geometria delle stazioni di monitoraggio.

Nel seguito sarà trattata la sola dimensione spaziale e definita "stima" l'operazione numerica di calcolo delle variabili meteorologiche in un qualsiasi punto o areola del territorio italiano, effettuata a partire dai dati delle stazioni delle reti di monitoraggio meteorologico archiviati nella BDAN (di seguito denominata rete di monitoraggio Sian): Rete Agrometeorologica Nazionale (RAN) del Mipaaf, Rete di monitoraggio del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, Osservatori meteorologici della rete di monitoraggio tradizionale del CRA-CMA (ex rete dell'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria) e alcune stazioni dei servizi agrometeorologici regionali localizzate in aree di territorio non campionate dalle tre reti di monitoraggio nazionali.

I dati meteorologici delle reti citate sono stati utilizzati per stimare, a partire dal 1961, i valori delle variabili meteorologiche giornaliere di ogni unità areale della griglia adottata dal Sian per il monitoraggio e la previsione meteorologica ai fini agricoli (griglia di analisi degli eventi meteorologici). La griglia è georiferita al sistema di coordinate geografiche e la dimensione media delle celle è di circa 10 km di lato.

Il grafico di figura 13 mostra la numerosità media mensile da gennaio 1981 a dicembre 2010 delle stazioni meteorologiche usate per modellare la struttura spaziale dei valori estremi giornalieri di temperatura e quelli di umidità relativa e della precipitazione totale.

La metodologia geostatistica di stima degli eventi meteorologici al suolo

La complessa e articolata morfologia del territorio italiano incide sulla dinamica e la termodinamica dell'atmosfera e determina variazioni sistematiche del segnale meteorologico (trend geografico). La stessa tendenza è rilevata in quasi tutti gli intervalli di tempo e, per molte variabili meteorologiche, le variazioni sono osservate su tutte le scale spaziali risolte dalle reti di monitoraggio esistenti, sia nazionali sia regionali. Ciò impone la scelta di una metodologia numerica non staziona-

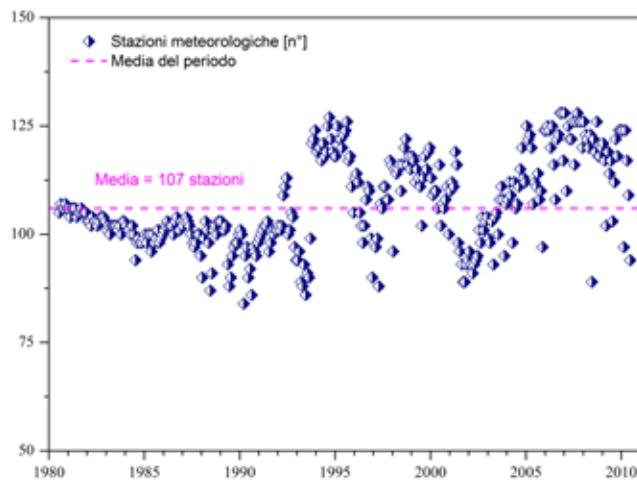


Figura 13 – Numerosità media mensile dei dati di temperatura e precipitazione giornaliera da gennaio 1981 a dicembre 2010

ria per eseguire una stima corretta ed efficace di queste variabili meteorologiche (Matheron, 1989). Per questo motivo si è scelto di applicare la geostatistica non stazionaria per stimare la temperatura minima e massima giornaliera e l'umidità relativa media notturna e diurna di ciascuna unità areale della griglia. In particolare, di seguito sarà descritta la metodologia geostatistica riferita alle temperature estreme giornaliere, per l'interesse che esse rivestono per l'agricoltura e le attività umane.

Una differente fenomenologia fisica caratterizza lo sviluppo spaziale delle precipitazioni. Le quantità pluviometriche giornaliere presentano variazioni geografiche irregolari, con passaggi da stati pluviometrici anche intensi ad assenza di precipitazione su distanze anche esse molto variabili, pur riconducibili a schemi di transizione non completamente stocastici. Per le precipitazioni si è ritenuto verosimile un locale comportamento stazionario (ipotesi di quasi stazionarietà) e, pertanto, è stato scelto il Kriging Ordinario per stimare le precipitazioni giornaliere delle unità areali della griglia.

Per entrambe le metodologie di stima è definito $z(t,x)$ il valore della variabile meteorologica nell'intervallo di coordinata tempo "t" e nel punto geografico di coordinata "x" ("x" rappresenta la coppia di coordinate geografiche: longitudine e latitudine) ed è assunta in tutti i punti geografici la seguente scomposizione del dato meteorologico (Matheron, 1970):

$$z(t,x) = m(t,x) + r(t,x)$$

dove:

– $m(t,x)$ identifica la tendenza o trend geografico della variabile meteorologica, che è associata al modello climatico e alla fisiografia del territorio o ai fenomeni meteorologici spazialmente estesi. Le variazioni di $m(t,x)$ si sviluppano con buona continuità spaziale sulle estensioni proprie dei rilievi orografici e delle aree d'influenza dei bacini idrici (marini e lacustri);

– il residuo $r(t,x)$ è lo scarto del segnale meteorologico rispetto alla tendenza geografica rappresentata dalla funzione $m(t,x)$. Le variazioni spaziali del residuo meteorologico $r(t,x)$ sono in genere irregolari e sfuggono a una modellazione matematica di tipo deterministica, anche se è ricorrente osservare una struttura spaziale dei residui derivante dal fenomeno meteorologico rappresentato.

Con l'approccio geostatistico i dati meteorologici $z(t,x)$ sono interpretati quali realizzazioni di una Funzione Aleatoria, in generale, non stazionaria $Z(t,x)$ (nel seguito le F.A. sono scritte in maiuscolo), il cui momento del primo ordine della distribuzione di probabilità varia da punto a punto e coincide, a meno di una costante, con la componente $m(t,x)$: $E[Z(t,x)] = m(t,x) + \text{costante}$ (la costante dipende da come è definita o scelta la funzione $m(t,x)$). Di conseguenza, il residuo o scarto meteorologico è assunto stazionario sull'intero territorio: $E[R(t,x)] = \text{costante}$. La F.A. $R(t,x)$ non è completamente stocastica e l'ampiezza media delle variazioni al quadrato cresce con l'estensione areale dell'intorno geografico.

La stima della variabile meteorologica $Z(t,x_0)$ dell'unità areale di griglia, centrata nel punto di coordinata " x_0 ", è definita come combinazione lineare (media pesata) dei dati meteorologici rilevati nello stesso intervallo di tempo dalle stazioni nell'intorno geografico del punto di coordinata " x_0 " (intorno di stima). Il valore stimato $Z^*(t,x_0)$ e la precisione della stima dipendono dalla struttura spaziale della variabile meteorologica e dal numero e dalla posizione delle stazioni di monitoraggio rispetto all'unità areale da stimare.

Per rendere operativa la metodologia geostatistica di stima è necessario determinare due quantità fondamentali: il trend geografico $m(t,x)$ e la struttura spaziale della variabile meteorologica (semivariogramma).

La conoscenza a priori o la modellazione del trend geografico $m(t,x)$ non è necessaria per stimare le F.A. quasi-stazionarie, quale ad esempio il comportamento spaziale assunto per le precipitazioni giornaliere.

Ricostruzione delle temperature minime e massime giornaliere

Per la stima delle temperature minima e massima giornaliera è stato applicato il CoKriging non stazionario con deriva esterna (Chilés e Delfiner 1999, 2012). Tale approccio è stato scelto per integrare i dati di temperatura rilevati dalle stazioni di monitoraggio con un secondo insieme di dati meteorologici consistenti sia con le leggi fisiche conosciute, che spiegano la dinamica spazio-temporale dell'atmosfera, sia con la fisiografia e la morfologia del territorio, discretizzate sulle stesse unità areali della griglia. Il secondo insieme di dati utilizzato è conosciuto con buona precisione sull'intero territorio italiano e rappresenta la componente deterministica $m(t,x)$ del campo meteorologico da ricostruire e da cui sono ricavati i gradienti spaziali delle temperature estreme giornaliere.

Il CoKriging (CoK) è stato scelto per imporre alla stima delle temperature estreme giornaliere la consistenza fisica tra le due variabili meteorologiche (temperatura massima superiore alla temperatura minima) e, allo stesso tempo, per migliorare la precisione di stima nei giorni con campionamento ridotto per la mancata rilevazione di una temperatura estrema in alcune stazioni della rete di monitoraggio.

La stima $Z_1^*(t,x_0)$ della temperatura minima giornaliera dell'unità areale centrata nel punto di coordinata " x_0 " è calcolata come combinazione lineare dei dati di temperatura minima $Z_1(t,x_i)$ e di temperatura massima $Z_2(t,x_i)$ rilevati lo stesso giorno di coordinata tempo " t " dalle stazioni nell'intorno geografico del punto di coordinata " x_0 ":

$$Z_1^*(t,x_0) = m_1^*(t,x_0) + \sum_i w_{1i} [Z_1(t,x_i) - m_1^*(t,x_i)] + \sum_i w_{2i} [Z_2(t,x_i) - m_2^*(t,x_i)]$$

dove $m_1^*(t,x)$ e $m_2^*(t,x)$ sono rispettivamente la stima del trend geografico della temperatura minima e massima giornaliera nel punto di coordinata " x ". Un'analoga combinazione lineare è utilizzata per stimare la temperatura massima giornaliera $Z_2(t,x_0)$. I coefficienti peso w_{1i} e w_{2i} sono calcolati minimizzando la differenza quadratica media tra il valore stimato e quello reale, che non sarà mai individuato, e imponendo la condizione di errore di stima medio nullo:

- media dell'errore di stima nulla ($E[Z^*(t,x_0) - Z(t,x_0)] = 0$);
- varianza dell'errore di stima minima ($E[(Z^*(t,x_0) - Z(t,x_0))^2] = \text{minima}$).

La scomposizione della temperatura nelle due componenti sta-

tisticamente non correlate: $z(t,x) = m(t,x) + r(t,x)$, ha un ulteriore vantaggio, quello di calcolare l'errore di stima totale come somma dell'errore di stima del trend termico $m(t,x)$, diffusamente e uniformemente conosciuto sull'intero territorio nazionale, e dell'errore di stima del residuo termico $r(t,x)$, che è conosciuto nei soli punti della rete di monitoraggio.

La componente deterministica

La componente deterministica $m(t,x)$ è stata utilizzata per calcolare le variazioni termiche tra coppie di punti che non sono riconducibili direttamente alla dinamica atmosferica e alla fisiografia e morfologia del territorio. La funzione $m(t,x)$ della temperatura al suolo è stata assunta proporzionale alla:

- previsione meteorologica di temperatura minima e massima delle prime 24 ore e alla quota del terreno (Wackernagel, 2004). Il dato di previsione è elaborato giornalmente dal modello numerico idrostatico ad area limitata DALAM con i dati acquisiti giornalmente dall'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (le previsioni meteorologiche sulla griglia sono disponibili dall'anno 2008). Quest'assunzione è stata applicata per stimare le temperature estreme giornaliere successive al 1° gennaio 2008:

$$m(t,x) = b_f z^f(t,x) + b_q q(x)$$

dove $z^f(t,x)$ e $q(x)$ sono rispettivamente la previsione meteorologica del giorno " t " dell'unità areale centrata nel punto di coordinate " x " e la quota altimetrica media della stessa unità areale e b_f e b_q i rispettivi coefficienti di proporzionalità;

- stima della temperatura del giorno precedente e alla quota del terreno (Libertà e Girolamo, 1992). In assenza della previsione meteorologica è stato utilizzato il dato stimato della stessa unità areale riferito al giorno precedente (persistenza meteorologica). Questa schematizzazione è stata applicata per stimare le temperature estreme giornaliere precedenti al 1° gennaio 2008:

$$m(t,x) = b_z z^*(t-1,x) + b_q q(x)$$

dove $z^*(t-1,x)$ e $q(x)$ sono rispettivamente la stima della temperatura del giorno " $t-1$ " dell'unità areale centrata nel punto di coordinate " x " e la quota altimetrica media della stessa unità areale e b_f e b_q i rispettivi coefficienti di proporzionalità.

Quest'ultima scelta, che analogamente alla prima introduce nel modello di stima la dinamica del sistema atmosfera-superficie terrestre, è motivata dal fatto che il tempo di autocorrelazione della temperatura giornaliera è sufficientemente alto (4 o 5 giorni), e il dato di un giorno è una buona previsione della temperatura del giorno successivo, in assenza di una previsione meteorologica elaborata da un modello numerico.

La struttura spaziale delle temperature estreme giornaliere

Nella teoria delle variabili regionalizzate la funzione semi-variogramma (nel seguito sarà utilizzato il termine variogramma) è lo strumento proposto per modellare la struttura spaziale di una F.A. a incrementi stazionari. L'analisi strutturale per la temperatura minima e massima giornaliera è stata eseguita sulle serie storiche giornaliere degli scarti termici normalizzati dal 1981 al 2010. Questa scelta è stata presa dopo aver verificato sperimentalmente che nelle macrozone italiane (Nord, Centro e Sud Italia e in Sicilia e Sardegna):

- le medie geografiche dei residui delle temperature estreme giornaliere $m_r(t,k)$ (l'indice k identifica la macrozona) oscillano casualmente intorno allo zero senza alcuna ciclicità temporale;
- le oscillazioni della varianza di dispersione geografica dei residui termici giornalieri $s_r^2(t,k)$ sono indipendenti dalle oscillazioni della media geografica.

Le medie e le varianze di dispersione giornaliere dal 1981 al 2010 sono state stimate a partire dai residui di temperatura minima e massima calcolati con i dati rilevati dalle stazioni meteorologiche: $r(t,x_i) = z(t,x_i) - m(t,x_i)$; dove $z(t,x_i)$ è la temperatura minima o massima giornaliera rilevata il giorno di coordinata tempo "t" dalla stazione localizzata nel punto di coordinata "x_i" e $m(t,x_i)$ è il corrispondente trend geografico. In figura 14 sono riportati gli scarti mensili normalizzati della temperatura minima giornaliera nel Nord e nel Centro-Sud Italia: $r_n(t,x_i) = [r(t,x_i) - m_r(t,k)] / s_r(t,k)$, da cui emerge una distribuzione di frequenza simmetrica e indipendente dalla ciclicità meteorologica stagionale. Lo stesso risultato è rilevato per gli scarti normalizzati della temperatura massima giornaliera.

La definizione di variogramma della F.A. $R(t,x)$ è $\gamma(h) = 0.5 E[(R(t,x+h) - R(t,x))^2]$ dove "x" è il vettore delle coordinate metriche e "h" è il vettore spostamento. Gli scarti termici normalizzati $r_n(t,x_i)$ sono stati utilizzati per calcolare i seguenti variogrammi direzionali:

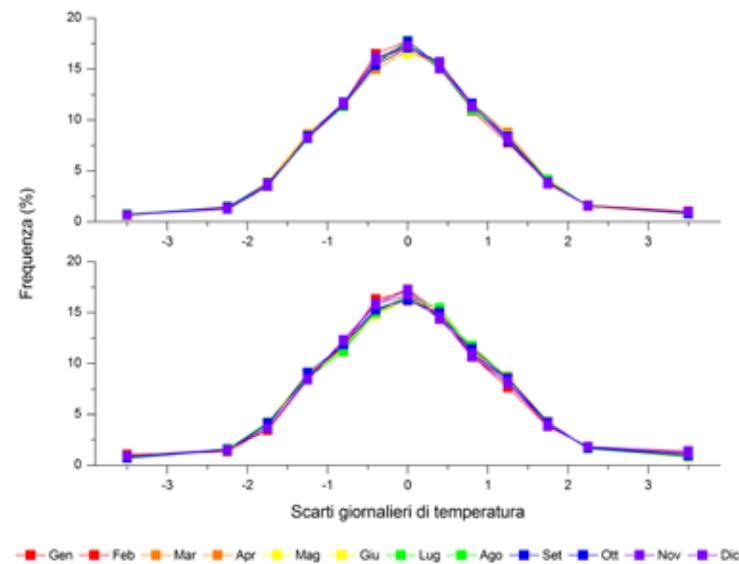


Figura 14 - Scarti mensili normalizzati di temperatura minima giornaliera nel Nord (sopra) e nel Centro-Sud (sotto)

- Nord Italia: sono stati calcolati i variogrammi riferiti alle quattro direzioni geografiche Ovest-Est 0°, Ovest-Est 45°, Ovest-Est 90° e Ovest-Est 135°;
- Centro-Sud Italia: sono stati calcolati i variogrammi riferiti alle quattro direzioni geografiche Ovest-Est 40°, Ovest-Est 85°, Ovest-Est 130° e Ovest-Est 175° (la direzione Ovest-Est 130° coincide con l'allineamento degli Appennini).

I variogrammi direzionali del Nord e del Centro-Sud Italia (figure 15, 16, 17 e 18) confermano l'ipotesi di stazionarietà del residuo termico $R(t,x)$ e, allo stesso tempo, rilevano una sostanziale isotropia strutturale della variabilità spaziale dei residui di temperatura minima e massima giornaliera sia al Nord Italia sia al Centro-Sud Italia. Per modellare la struttura spaziale è stato utilizzato lo schema di variogramma sferico, che è definito dalla distanza di correlazione (*range*), dalla varianza associata alle variazioni locali non risolte dalla rete di monitoraggio Sian (*nugget*) e dalla varianza di dispersione geografica degli scarti giornalieri normalizzati (*sill*). Nelle tabelle II e III sono riportati i tre parametri di base dei modelli di variogramma degli scarti normalizzati di temperatura minima e massima giornaliera riferiti ai 12 mesi dell'anno. I modelli di variogramma delle temperature estreme del giorno di coordinata tempo "t" (data espressa in giorno, mese e anno) sono ottenuti dai modelli dei variogrammi mensili degli scarti gior-

nalieri normalizzati moltiplicando il coefficiente *nugget* e il coefficiente *sill* del mese di riferimento (tabelle II e III) per la varianza di dispersione dei residui termici del giorno di coor-

dinata tempo "t".

Alle regioni Sicilia e Sardegna sono stati assegnati gli stessi modelli di variogramma del Centro e Sud Italia (tabella III).

Tabella II – Parametri dei modelli di variogramma della temperatura nel Nord Italia

Mese	Temperatura minima			Temperatura massima		
	<i>range</i> (km)	<i>nugget</i>	<i>sill</i>	<i>range</i> (km)	<i>nugget</i>	<i>sill</i>
Gennaio	160	0,30	1,10	175	0,15	1,10
Febbraio	165	0,29	1,10	183	0,15	1,08
Marzo	170	0,28	1,10	191	0,15	1,06
Aprile	175	0,27	1,10	200	0,15	1,05
Maggio	175	0,29	1,08	191	0,15	1,05
Giugno	175	0,33	1,06	183	0,15	1,05
Luglio	175	0,35	1,07	175	0,15	1,05
Agosto	170	0,35	1,07	175	0,15	1,05
Settembre	165	0,35	1,06	175	0,15	1,05
Ottobre	160	0,35	1,05	175	0,15	1,05
Novembre	160	0,33	1,07	175	0,15	1,05
Dicembre	160	0,31	1,08	175	0,15	1,05

Tabella III – Parametri dei modelli di variogramma della temperatura nel Centro-Sud Italia

Mese	Temperatura minima			Temperatura massima		
	<i>range</i> (km)	<i>nugget</i>	<i>sill</i>	<i>range</i> (km)	<i>nugget</i>	<i>sill</i>
Gennaio	160	0,40	1,00	160	0,20	1,00
Febbraio	160	0,40	1,00	182	0,20	1,02
Marzo	160	0,40	1,00	204	0,20	1,04
Aprile	160	0,40	1,00	225	0,20	1,05
Maggio	156	0,40	1,03	216	0,20	1,05
Giugno	153	0,40	1,05	208	0,20	1,05
Luglio	150	0,40	1,07	200	0,20	1,05
Agosto	153	0,40	1,05	191	0,20	1,04
Settembre	156	0,40	1,03	183	0,20	1,02
Ottobre	160	0,40	1,00	175	0,20	1,00
Novembre	160	0,40	1,00	170	0,20	1,00
Dicembre	160	0,40	1,00	165	0,20	1,00

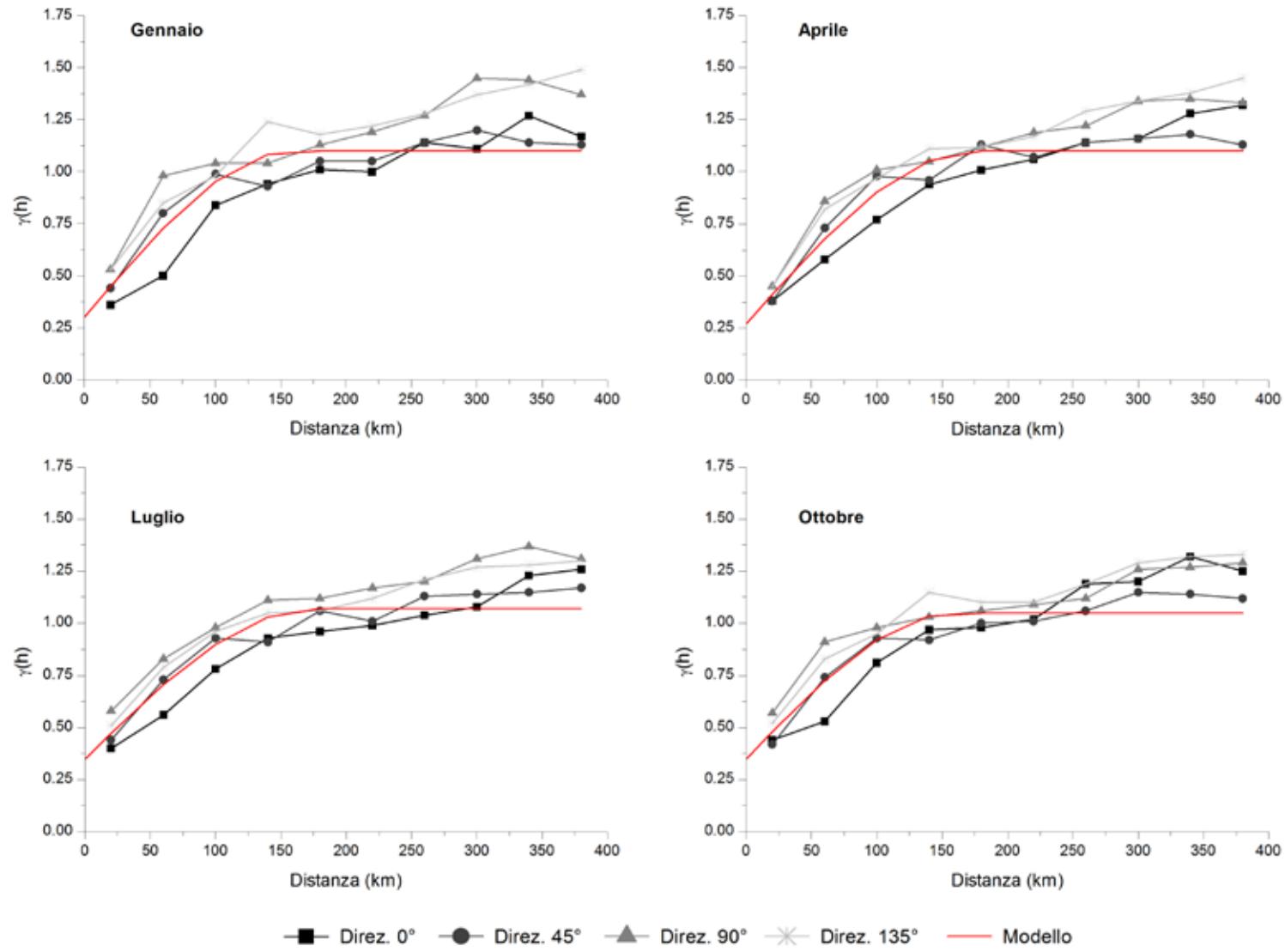


Figura 15 - Variogramma dei residui normalizzati di temperatura minima nel Nord Italia

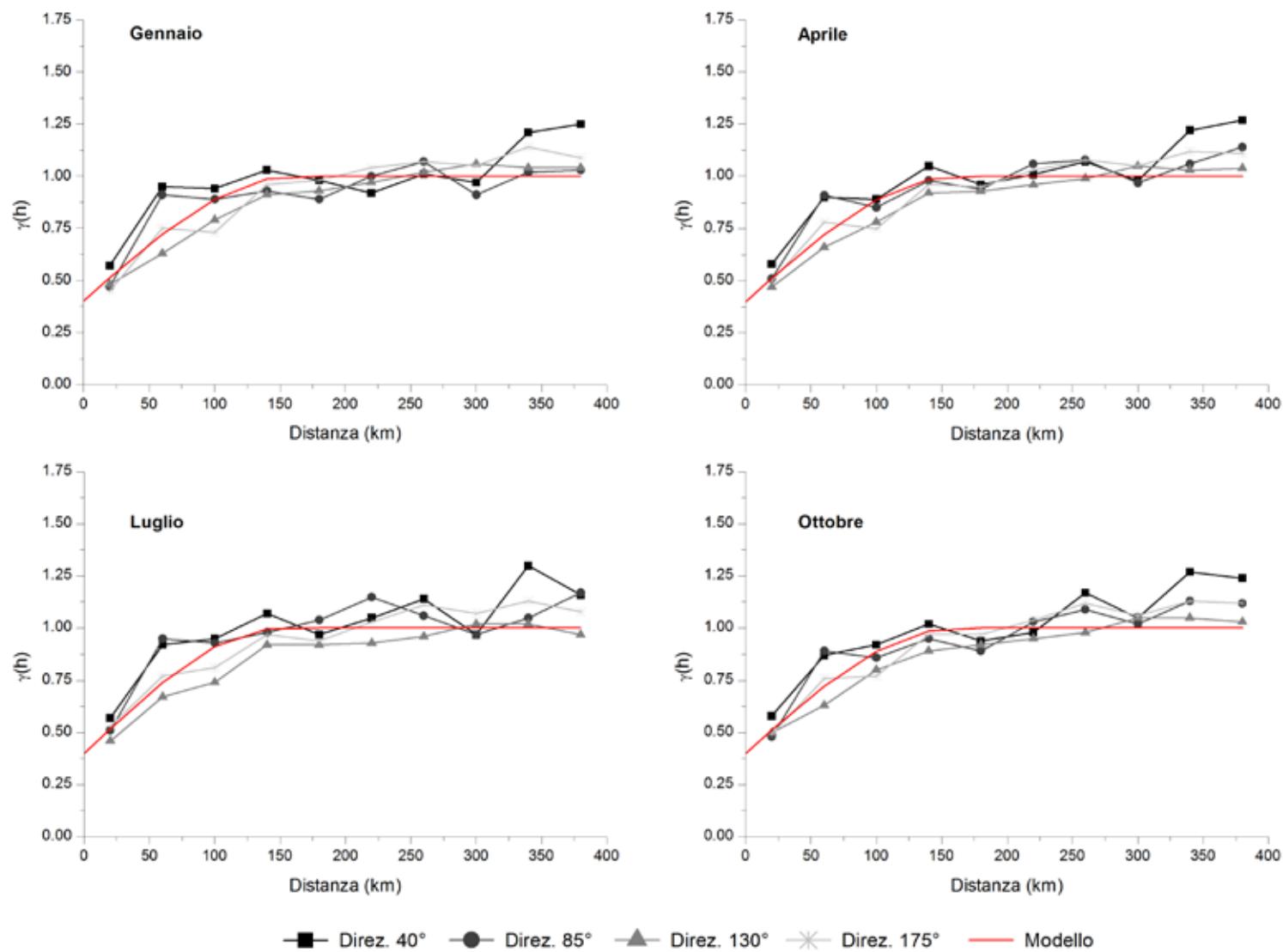


Figura 16 - Variogramma dei residui normalizzati di temperatura minima nel Centro-Sud Italia

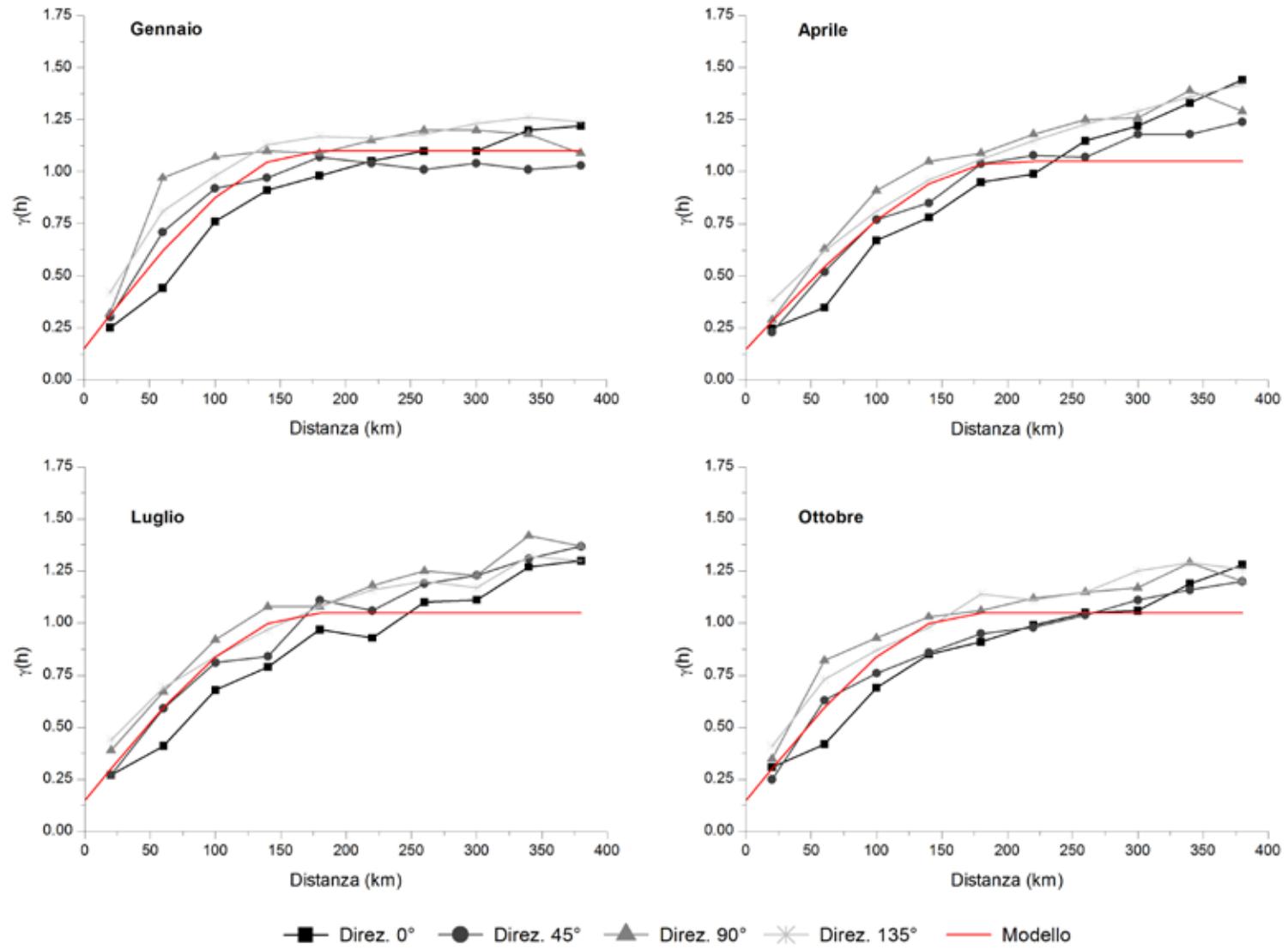


Figura 17 - Variogramma dei residui normalizzati di temperatura massima nel Nord Italia

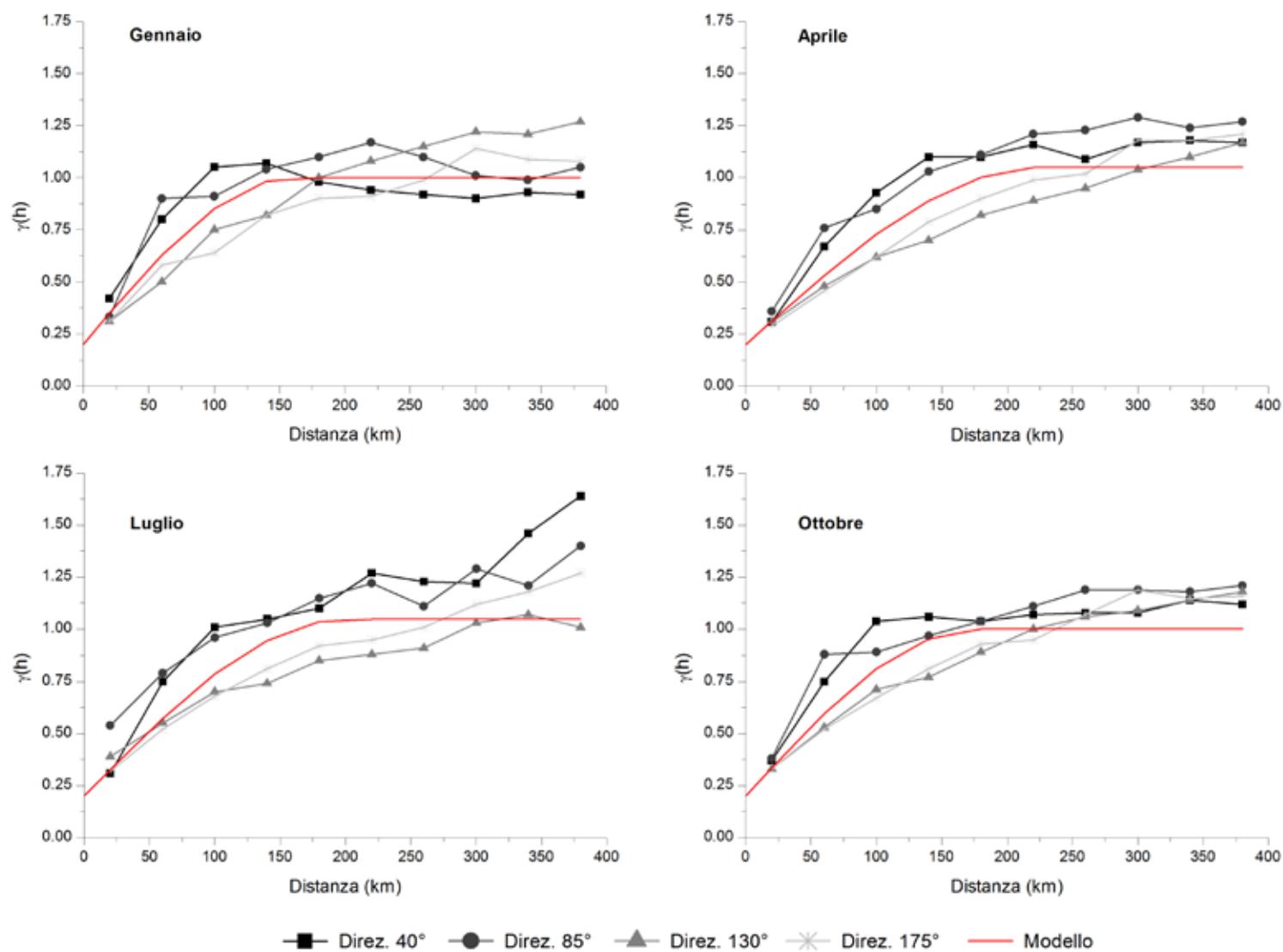


Figura 18 - Variogramma dei residui normalizzati di temperatura massima nel Centro-Sud Italia

Ricostruzione delle precipitazioni giornaliere

Le precipitazioni sono fenomeni meteorologici transitori d'intensità molto variabile che, nella loro evoluzione temporale, interessano porzioni di territorio a volte molto estese, anche se, ai fini del monitoraggio, gli eventi pluviometrici osservati sono limitati a un'area geografica e analizzati su singoli intervalli temporali. La scansione temporale imposta dal monitoraggio meteorologico genera una serie di distribuzioni spaziali delle precipitazioni, in cui l'evento giornaliero locale più frequente in Italia è l'assenza di precipitazioni. Nei giorni piovosi le precipitazioni sono circoscritte in aree più o meno estese del territorio e il passaggio da siti d'intensità pluviometrica anche elevata a zone senza precipitazioni avviene su distanze molto variabili, ma riconducibili a schemi di transizione simili.

La struttura spaziale delle precipitazioni giornaliere

Le precipitazioni italiane presentano una ben documentata regionalizzazione spazio-temporale caratterizzata da un graduale incremento della media climatica da Sud a Nord e una maggiore concentrazione di precipitazioni nei mesi primaverili e autunnali. In questi periodi dell'anno sono più frequenti gli eventi pluviometrici e le precipitazioni giornaliere spazialmente estese. Quest'ultimo carattere stagionale non è conoscibile con esattezza perché il limite areale delle precipitazioni è ricostruito sulla geometria della rete di monitoraggio meteorologico: il profilo pluviometrico tra una stazione che ha rilevato un evento pluviometrico e la stazione limitrofa senza precipitazioni non è mai conosciuto. All'indeterminatezza spaziale si aggiunge la frammentaria conoscenza dell'intensità pluviometrica, che è misurata nei soli siti d'osservazione del sistema atmosfera-superficie terrestre. All'esterno delle aree pluviometriche la variabilità spaziale è nulla per definizione, mentre all'interno delle aree pluviometriche le variazioni dell'intensità pluviometrica sono tanto maggiori quanto maggiore è la precipitazione media areale.

Ne segue che la varianza di dispersione geografica dell'intensità pluviometrica dipende dall'estensione areale degli eventi pluviometrici e dalla media delle precipitazioni giornaliere. La relazione tra la varianza di dispersione geografica e la precipitazione media giornaliera è stata determinata sperimentalmente sulle principali macrozone del territorio italiano, di estensione compresa tra i 200 e i 300 km (scala di osservazione

sub-nazionale), combinando l'informazione fenomenologica e quantitativa ricavate dai dati di precipitazione giornaliera $z(t, x_i)$, rilevata il giorno di coordinata tempo "t" dalla stazione meteorologica localizzata nel punto di coordinata "x_i". Le medie e le varianze di dispersione delle precipitazioni giornaliere dal 1981 al 2010 delle 8 macrozone del territorio italiano (tab. I) sono state calcolate con i dati rilevati dalle stazioni della rete di monitoraggio Sian. La relazione analitica tra la varianza di dispersione e la media delle precipitazioni giornaliere, determinata sulle 8 principali macrozone, è stata poi associata a tutte le macrozone del territorio italiano con estensione areale di circa 45.000 km²:

$$S_{\omega}^2(t, v_x) = \beta^2 f(t, v_x) [m(t, v_x) / f(t, v_x)]^{2\alpha}$$

dove $m(t, v_x)$ e $f(t, v_x)$ sono rispettivamente la precipitazione media nella macrozona v_x centrata nel punto di coordinata "x" e la frazione di stazioni meteorologiche interne alla stessa macrozona che nel giorno di coordinata tempo "t" hanno rilevato un evento pluviometrico ($z(t, x_i) > 0$), e α e β i coefficienti del modello analitico $S_{\omega}^2(t, v_x)$. In figura 19 sono mostrati, per il mese di aprile, i diagrammi di dispersione tra la deviazione standard $s(t, v_x)$ moltiplicata per $f(t, v_x)^{0.5}$ e la media delle precipitazioni giornaliere $m(t, v_x)$ di 6 macrozone della penisola italiana. I coefficienti α e β del mese di Aprile sono stati calcolati sui diagrammi di dispersione tra la media e la deviazione standard giornaliera degli anni dal 1981 al 2010. Analoga procedura è stata applicata per calcolare i coefficienti α e β degli altri 11 mesi dell'anno (tabella IV).

Tabella IV – Coefficienti α e β delle macrozone del Nord, Centro e Sud Italia

Mese	Nord Italia		Centro Italia		Sud Italia	
	α	β	α	β	α	β
Gennaio	0,99	1,07	0,93	1,06	0,86	1,04
Febbraio	0,96	1,08	0,90	1,04	0,85	1,03
Marzo	0,97	1,10	0,92	1,05	0,89	1,00
Aprile	0,94	1,12	0,92	1,08	0,88	1,04
Maggio	1,00	1,15	0,97	1,09	0,94	1,01
Giugno	1,03	1,20	1,05	1,11	1,01	1,09
Luglio	1,03	1,18	1,05	1,08	1,05	1,09
Agosto	1,06	1,16	1,09	1,10	1,04	1,06
Settembre	1,04	1,13	1,03	1,12	1,01	1,08
Ottobre	0,97	1,10	1,00	1,07	0,97	1,05
Novembre	0,96	1,10	0,95	1,09	0,94	1,03
Dicembre	0,97	1,08	0,93	1,05	0,91	1,04

I variogrammi dell'intensità pluviometrica giornaliera alla scala d'osservazione sub-nazionale sono stati modellati per le due seguenti categorie di fenomeni meteorologici:

- precipitazioni giornaliere locali di estensione areale inferiore o poco superiore alla distanza media tra le centraline della rete di monitoraggio Sian;
- precipitazioni giornaliere estese associate a corpi nuvolosi appartenenti a formazioni cicloniche o a strutturati fronti d'instabilità meteorologica che interessano estese e continue aree di territorio.

Per entrambe le categorie di precipitazioni giornaliere, la rete di monitoraggio Sian esegue un campionamento rappresentativo della distribuzione spaziale delle precipitazioni giornaliere ma, per com'è stata definita la prima categoria di eventi, le precipitazioni locali sono rilevate da una o al massimo due stazioni meteorologiche o possono anche non essere rilevate dalla rete di monitoraggio Sian. Le variazioni spaziali dell'intensità pluviometrica delle precipitazioni locali si sviluppano su distanze inferiori alle decine di chilometri, che non sono risolte dalla rete di monitoraggio Sian perché inferiori alla distanza tra le stazioni meteorologiche. Ai fini della modellazione geostatistica il fenomeno meteorologico rilevato è completamente stocastico. Il modello di variogramma presenta solo il coefficiente di *nugget*, che coincide con la varianza di dispersione geografica dell'intensità pluviometrica $S_{\omega}^2(t, v_x)$.

Gli eventi pluviometrici spazialmente estesi sono rilevati da un numero maggiore di stazioni meteorologiche, per esempio più del 40% delle stazioni di una macrozona (più di 6 stazioni su una media di 15). Per questi eventi i variogrammi dell'intensità pluviometrica giornaliera sono stati ricondotti al seguente modello: $\gamma(t, h) = S_{\omega}^2(t, v_x) \gamma_0(t, h)$; dove $\gamma_0(t, h)$ è il variogramma medio relativo, che è stato determinato per le macrozone del territorio italiano sulle differenze al quadrato dei dati di precipitazioni giornaliere, rilevati dalle stazioni della rete di monitoraggio Sian, rapportate alla variabilità spaziale giornaliera della macrozona: $d(t, |x_i - x_j|)^2 = [z(t, x_i) - z(t, x_j)]^2 / s^2(t, k)$.

L'analisi strutturale della distribuzione spaziale delle precipitazioni giornaliere estese è stata eseguita nelle macrozone italiane utilizzando i dati di precipitazione dei soli giorni in cui la frazione di stazioni meteorologiche che hanno rilevato un evento pluviometrico è risultata maggiore di 0.35 ($f(t, v_x) > 0.35$). Le serie storiche delle precipitazioni giornaliere dal 1981 al 2010 sono state utilizzate per calcolare i seguenti variogrammi relativi direzionali:

– Nord Italia: sono stati calcolati i variogrammi riferiti alle quattro direzioni geografiche Ovest-Est 0°, Ovest-Est 45°, Ovest-Est 90° e Ovest-Est 135°;

– Centro e Sud Italia: sono stati calcolati i variogrammi riferiti alle quattro direzioni geografiche Ovest-Est 40°, Ovest-Est 85°, Ovest-Est 130° e Ovest-Est 175° (la direzione Ovest-Est 130° coincide con l'allineamento degli Appennini).

I variogrammi relativi direzionali del Nord e del Centro-Sud Italia (figure 20 e 21) confermano l'ipotesi di stazionarietà dell'intensità pluviometrica giornaliera alla scala sub-nazionale e, allo stesso tempo, rilevano una sostanziale isotropia strutturale della variabilità spaziale al Nord Italia e al Centro-Sud Italia. Per modellare la struttura spaziale delle precipitazioni giornaliere estese è stato utilizzato lo schema di variogramma sferico. Nella tabella V sono riportati i parametri di base dei modelli di variogramma relativi dell'intensità pluviometrica giornaliera riferiti ai 12 mesi dell'anno: distanza di correlazione (*range*), varianza associata alle variazioni locali non risolte dalla rete di monitoraggio Sian (*nugget*) e varianza di dispersione relativa dell'intensità pluviometrica giornaliera (*sill*).

Alle regioni Sicilia e Sardegna sono stati assegnati gli stessi modelli di variogramma relativi del Centro e Sud Italia (tabella V).

Tabella V – Parametri dei modelli di variogramma delle precipitazioni giornaliere

Mese	Nord Italia			Centro Sud Italia		
	<i>range</i> (km)	<i>nugget</i>	<i>sill</i>	<i>range</i> (km)	<i>nugget</i>	<i>sill</i>
Gennaio	160	0,25	1,09	140	0,30	1,30
Febbraio	165	0,30	1,10	160	0,35	1,35
Marzo	170	0,35	1,12	180	0,40	1,40
Aprile	170	0,35	1,12	200	0,50	1,45
Maggio	150	0,40	1,10	170	0,55	1,30
Giugno	130	0,50	1,05	140	0,60	1,15
Luglio	105	0,55	1,00	100	0,65	1,05
Agosto	130	0,50	1,10	120	0,60	1,20
Settembre	160	0,35	1,20	150	0,50	1,35
Ottobre	180	0,25	1,30	180	0,40	1,50
Novembre	175	0,25	1,20	170	0,40	1,45
Dicembre	170	0,25	1,15	150	0,35	1,35

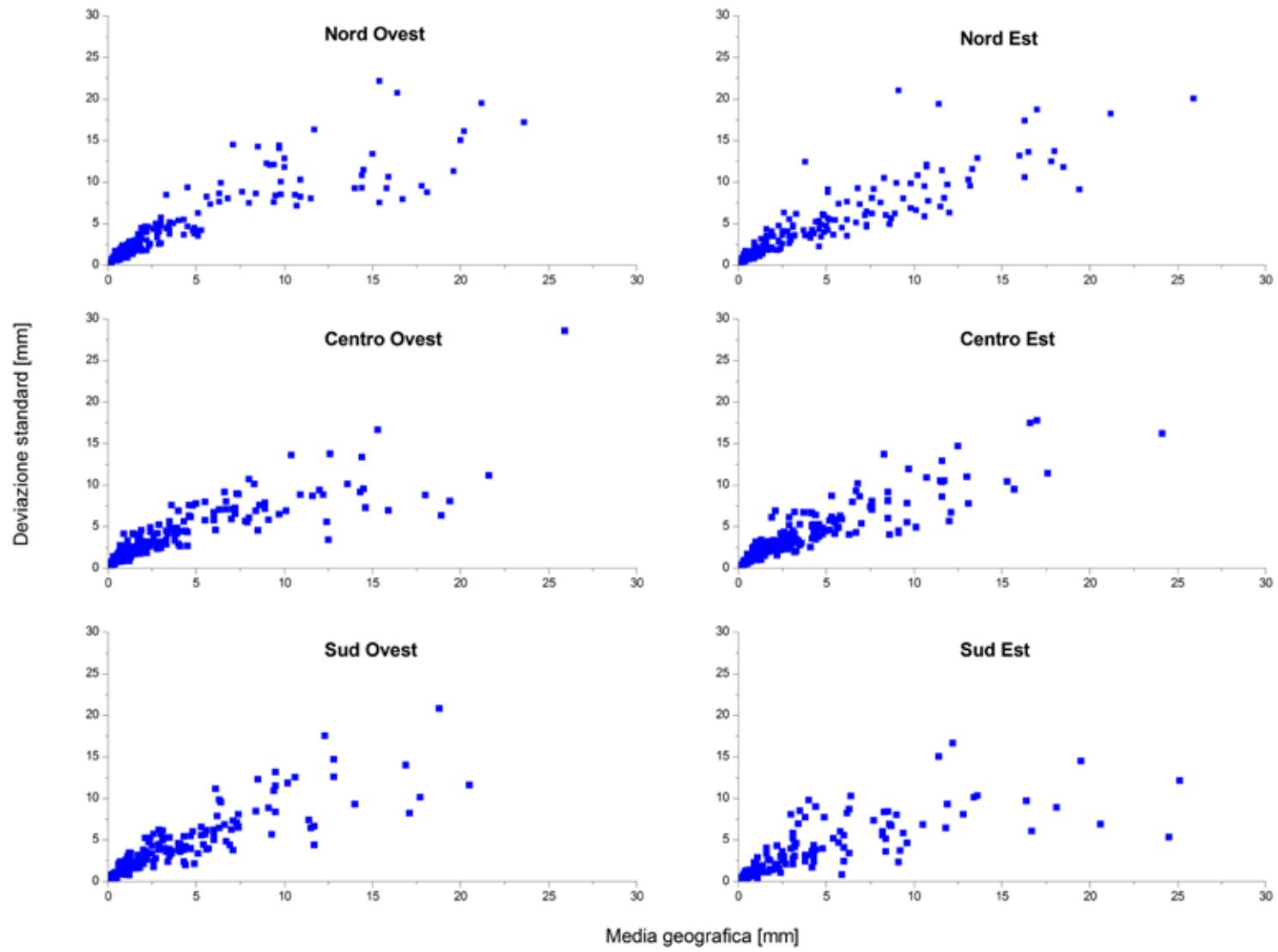


Figura 19 - Diagrammi di correlazione tra media e deviazione standard delle precipitazioni

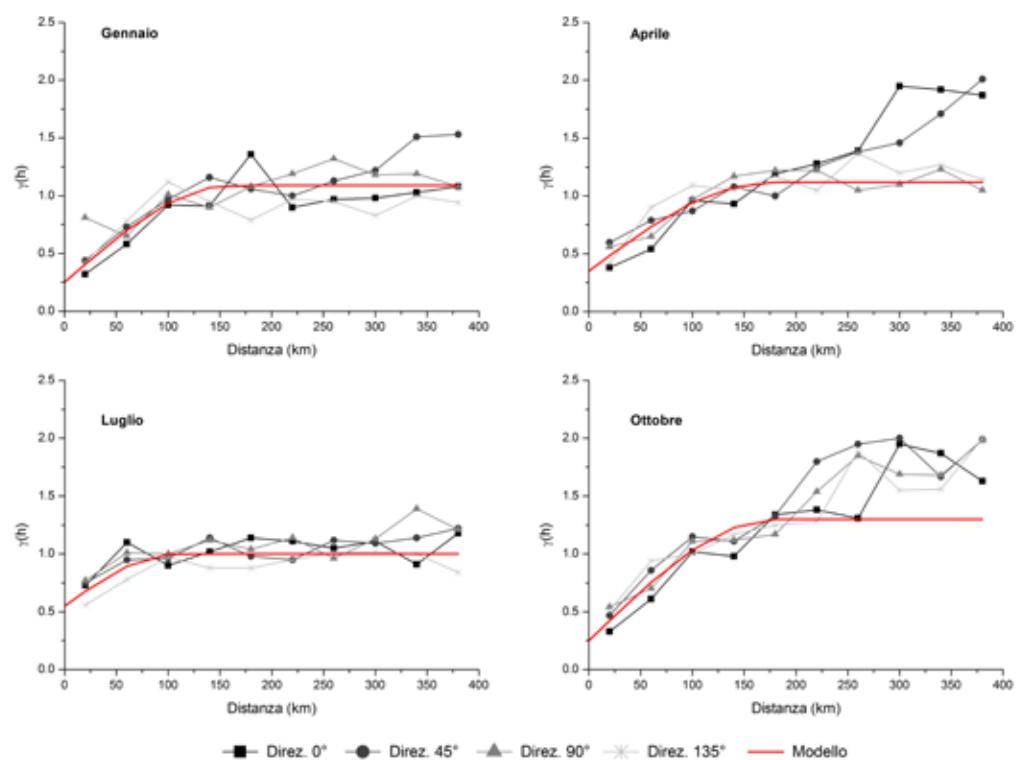


Figura 20 – Variogrammi relativi alle precipitazioni nel Nord Italia

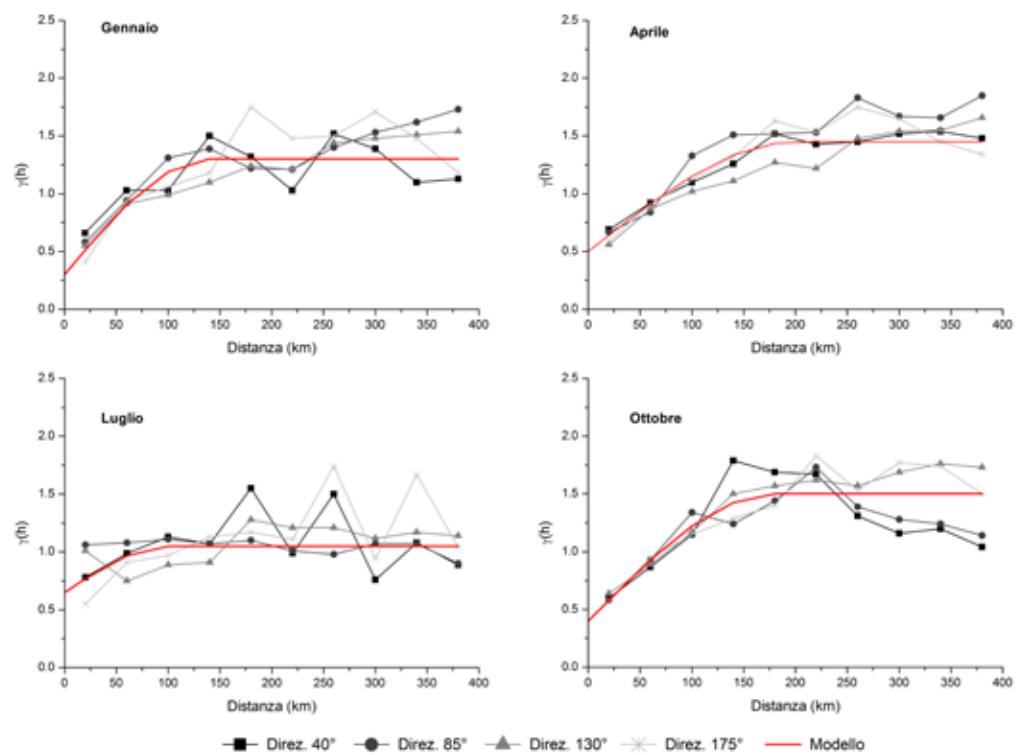


Figura 21 - Variogrammi relativi alle precipitazioni nel Centro e Sud Italia

La stima delle precipitazioni giornaliere

Le precipitazioni giornaliere delle unità areali della griglia sono state stimate applicando il Kriging Ordinario (KO). La stima $Z^*(t, x_o)$ delle precipitazioni giornaliere dell'unità areale di griglia centrata nel punto di coordinata " x_o " è calcolata come combinazione lineare (media pesata) dei dati di precipitazione rilevati nello stesso giorno di coordinate tempo " t " dalle stazioni meteorologiche nell'intorno geografico del punto di coordinata " x_o " (intorno di stima):

$$Z^*(t, x_o) = \sum_i w_i Z(t, x_i)$$

Il calcolo dei coefficienti peso w_i è ottenuto imponendo allo stimatore le due canoniche condizioni sull'errore di stima:

- media dell'errore di stima nulla ($E[Z^*(t, x_o) - Z(t, x_o)] = 0$)
- varianza dell'errore di stima minima ($E[(Z^*(t, x_o) - Z(t, x_o))^2] = \text{minima}$).

Per stimare le precipitazioni giornaliere è stato utilizzato il modello di variogramma relativo dell'intensità pluviometrica $\gamma_o(t, h)$. Ciò comporta che la varianza di stima di ogni unità areale della griglia risultata dall'applicazione del KO deve essere corretta per tener conto della precipitazione media locale della macrozona centrata sulla stessa unità areale e nel giorno di coordinata tempo " t ". La varianza di stima corretta è: $\sigma_k^2(t, x_o) = S_{\omega}^2(t, v_x) \sigma_{KO}^2(t, x_o)$, dove $\sigma_{KO}^2(t, x_o)$ è la varianza di stima delle precipitazioni giornaliere dell'unità areale di griglia centrata nel punto di coordinata " x_o " calcolata dal KO.

Validazione del modello di stima

Gli stimatori geostatistici lineari sono impostati sul modello struttura della variabile regionalizzata da ricostruire. Dal modello di variogramma discendono i coefficienti peso della stima e la varianza di stima (varianza dell'errore di stima). Una volta scelto il modello di variogramma della variabile regionalizzata, l'applicazione della metodologia di stima è una sequenza di passaggi algebrici ben sperimentati nella pratica.

La rappresentatività dei modelli di variogramma utilizzati per ricostruire i campi termici e pluviometrici rispetto alla reale struttura spaziale delle temperature estreme giornaliere e delle precipitazioni giornaliere è stata verificata utilizzando i dati rilevati da un insieme di stazioni meteorologiche non incluse nella rete di monitoraggio Sian (*external validation*). La tecnica statistica di validazione applicata si basa sul confronto statistico dei dati meteorologici giornalieri rilevati dalle stazioni di controllo ($z(t, x_i)$) con i dati ter-

mici e pluviometrici stimati rispettivamente mediante il CoK non stazionario con deriva esterna e il KO per le medesime stazioni di controllo ($z^*(t, x_i)$). Di ogni stazione è calcolato l'errore di stima $e(t, x_i) = z^*(t, x_i) - z(t, x_i)$; dove " x_i " è la coordinata della stazione di controllo i -esima.

Le 83 stazioni di controllo sono state selezionate tra quelle presenti nella "Rilevazione dati meteorologici ed idrologici" dell'ISTAT (a cui partecipa il CRA-CMA) sulla base di alcuni requisiti fondamentali. Le stazioni dovevano essere:

- funzionanti negli anni 2000 e 2008;
- non appartenenti alle reti meteorologiche nazionali presenti nella BDAN del Sian (stazioni utilizzate per stimare le temperature estreme giornaliere e le precipitazioni dei siti delle stazioni di controllo);
- installate a quote sul livello del mare non superiore ai 1500 m;
- distribuite sull'intero territorio nazionale.

Le stazioni selezionate sono rappresentate per classi altimetriche nella mappa di figura 22, la quota massima delle stazioni di controllo è 1240 m. Per la validazione del modello strutturale delle temperature estreme giornaliere e delle precipitazioni sono stati utilizzati alcuni indici statistici di confronto dell'insieme dei dati rilevati dalle stazioni di controllo (dati osservati) con l'insieme dei dati stimati.

I risultati della validazione condotta per gli anni 2000 e 2008 sono riportati nella tabella VI, distinti per tre classi altimetriche (minore di 200 m, compresa tra 200 m e 400 m e superiore a 400 m). Dall'esame degli indici statistici emerge una sovrastima delle temperature minime giornaliere (T_n) e una sottostima delle temperature massime giornaliere (T_x), come si ricava dall'indice di massa residua (Cr_m), che assume valori negativi per le temperature minime e positivi per le temperature massime. L'indice Mae indica un errore medio di stima di circa 2.0 °C per entrambe le temperature estreme giornaliere (Fig. 23). In generale, si nota un miglioramento dell'efficienza di stima ($Me > 0$) nell'anno 2008, probabilmente dovuto all'affinamento delle procedure di stima che proprio da questa data implementano anche i dati di previsione meteorologica a 24 ore delle temperature estreme giornaliere (modello di previsione DALAM). Riguardo alle precipitazioni la tabella evidenzia una riduzione dell'accuratezza di stima all'aumentare della quota, in particolare l'indice Cr_m denota una tendenza alla sottostima per quote maggiori di 400 m slm. In figura 24 è riportata la distribuzione territoriale complessiva (per entrambi gli anni) dell'indice Mae per le temperature e le precipitazioni.

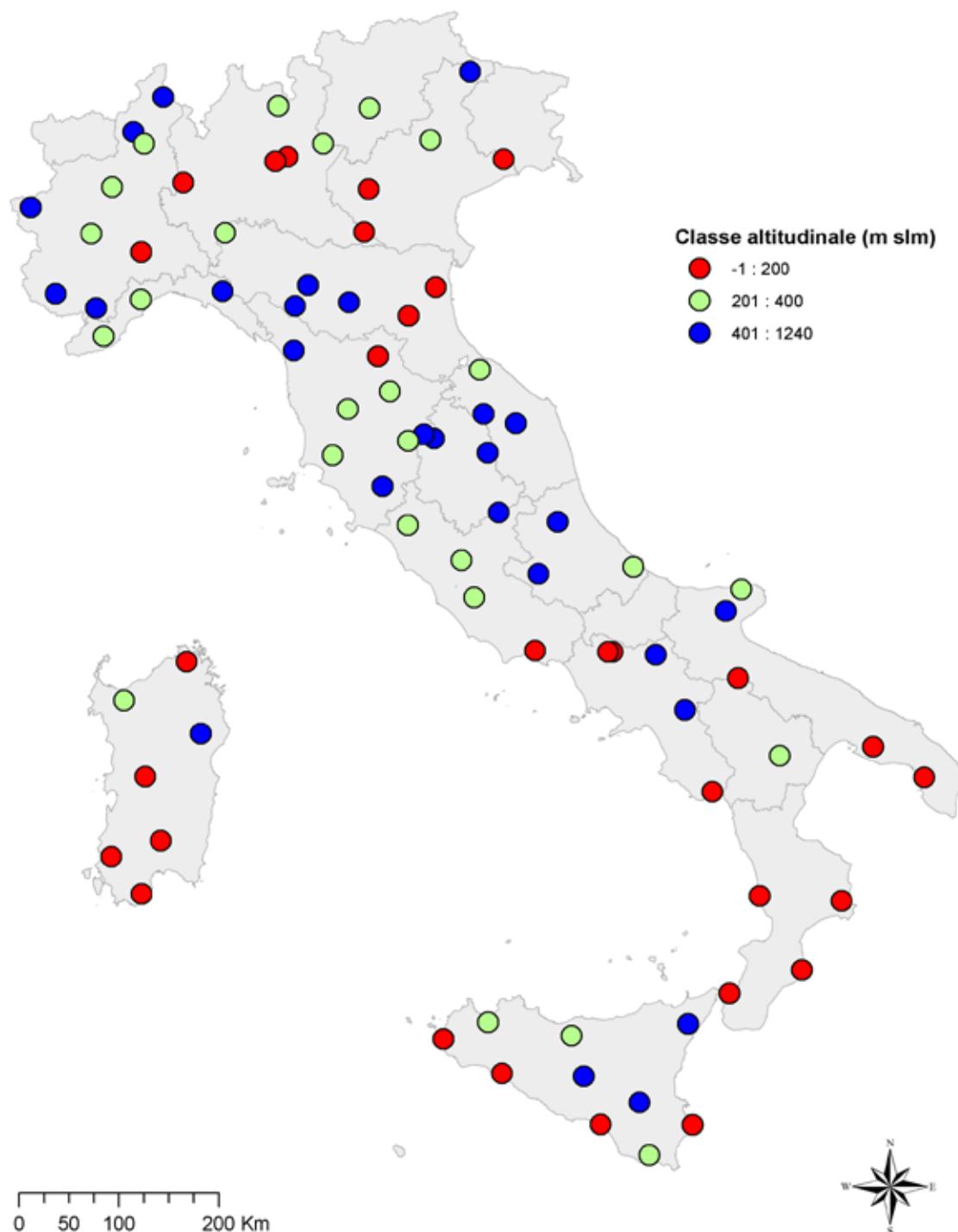


Figura 22 – Mappa delle stazioni meteorologiche utilizzate nella validazione

Tabella VI – Indici statistici degli errori di stima delle temperature estreme giornaliere e delle precipitazioni totali giornaliere

Variabile	Anno	Classe altitudinale (m)	N° stazioni	Media					Deviazione standard			
				Rmse (1)	Mae (2)	Crm (3)	Me (4)	R ² (5)	Rmse (1)	Mae (2)	Crm (3)	Me (4)
Tn	2000	< 200	25	2,49	2,10	-0,09	-0,16	0,85	0,87	0,80	0,17	0,92
		200 - 400	14	2,35	1,96	-0,01	-0,17	0,84	1,00	0,93	0,20	1,00
		> 400	18	2,56	2,14	-0,09	-0,03	0,86	0,62	0,60	0,35	0,49
	2008	< 200	11	2,18	1,78	-0,12	0,47	0,91	0,69	0,62	0,14	0,24
		200 - 400	12	2,58	2,18	-0,20	0,11	0,88	0,96	0,90	0,25	0,61
		> 400	13	2,28	1,85	-0,04	0,35	0,88	0,58	0,52	0,34	0,30
Tx	2000	< 200	25	2,54	2,12	0,05	0,00	0,90	0,97	0,88	0,07	0,97
		200 - 400	14	2,59	2,11	0,05	0,31	0,91	0,89	0,88	0,07	0,35
		> 400	18	2,81	2,31	0,04	0,15	0,90	0,77	0,73	0,07	0,52
	2008	< 200	11	2,49	2,09	0,07	0,45	0,94	0,99	0,94	0,06	0,32
		200 - 400	12	2,44	1,97	0,05	0,38	0,91	0,94	0,80	0,07	0,70
		> 400	13	2,34	1,83	0,06	0,57	0,92	0,70	0,59	0,06	0,24
Rr	2000	< 200	25	5,70	1,88	-0,16		0,27	2,95	0,54	0,46	
		200 - 400	14	6,55	1,97	-0,34		0,16	5,76	0,94	0,84	
		> 400	19	8,23	2,83	0,19		0,30	4,95	1,54	0,25	
	2008	< 200	16	5,18	1,98	0,03		0,42	1,54	0,65	0,22	
		200 - 400	18	6,79	2,63	-0,01		0,39	1,77	0,74	0,42	
		> 400	16	9,93	3,37	0,32		0,25	4,18	1,17	0,21	

- (1) Root mean square error (deviazione standard): è una misura dell'ordine di grandezza dell'errore e cioè delle deviazioni dei valori simulati rispetto agli osservati
- (2) Mean absolute error: (errore medio assoluto), rispetto al Rmse è meno sensibile alla presenza di valori estremi
- (3) Coefficiente di massa residua: il valore ottimale è 0; se Crm > 0 il modello sottostima, se Crm < 0 il modello sovrastima
- (4) Efficienza del Modello: l'indice tende ad 1 quando i valori stimati si approssimano a quelli osservati, assume valori positivi quando il modello di stima applicato è uno stimatore migliore rispetto alla media delle osservazioni, mentre risulta negativo nel caso opposto
- (5) Coefficiente di determinazione (R²): il suo valore si approssima ad 1 per stime accurate; esprime la frazione di variabilità della variabile misurata che è spiegata dal modello

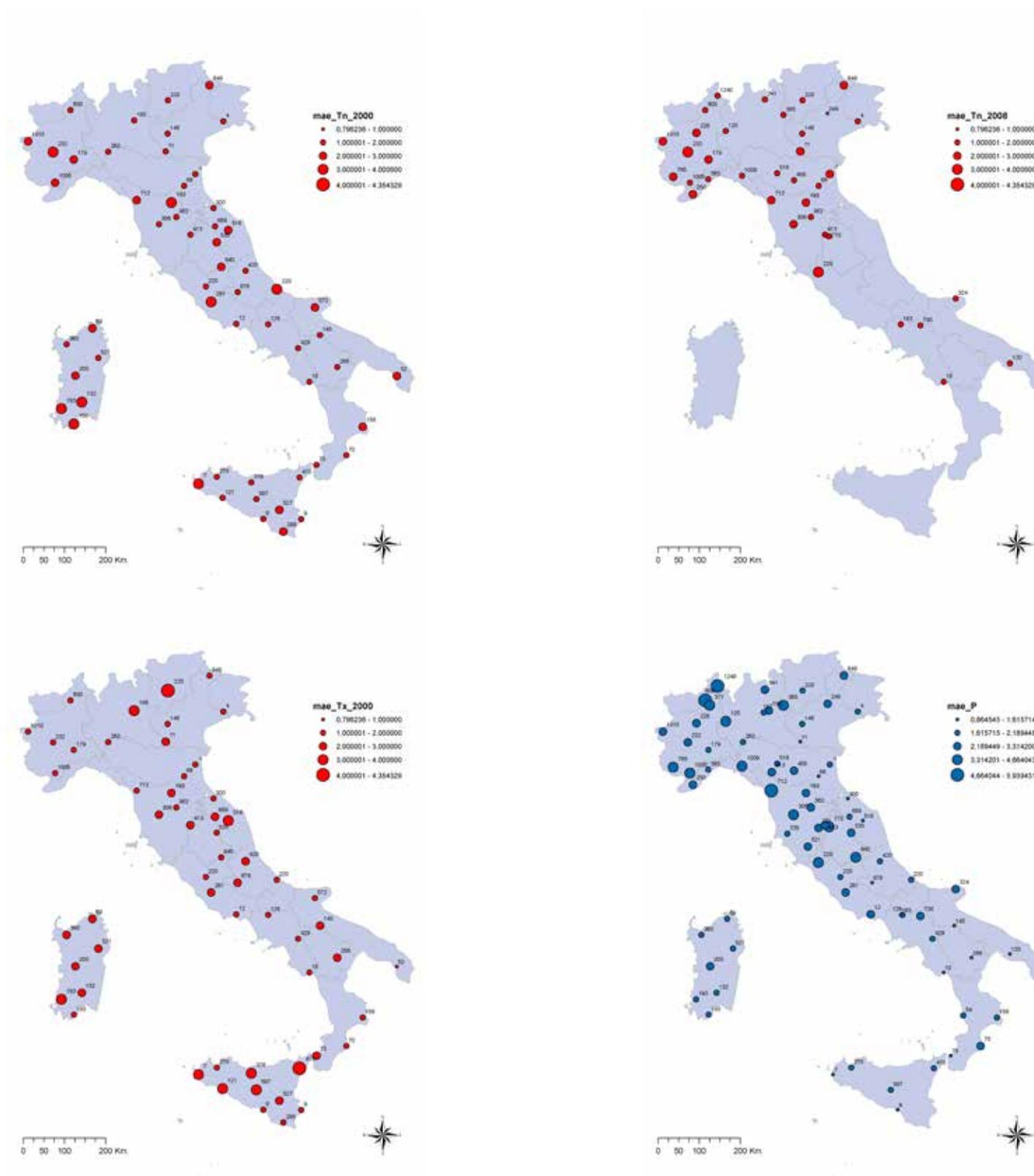


Figura 23 - Mappa dell'errore medio assoluto (Mae) per le temperature giornaliere minime (Tn), in alto, e le temperature giornaliere massime (Tx), in basso, nell'anno 2000 e nell'anno 2008

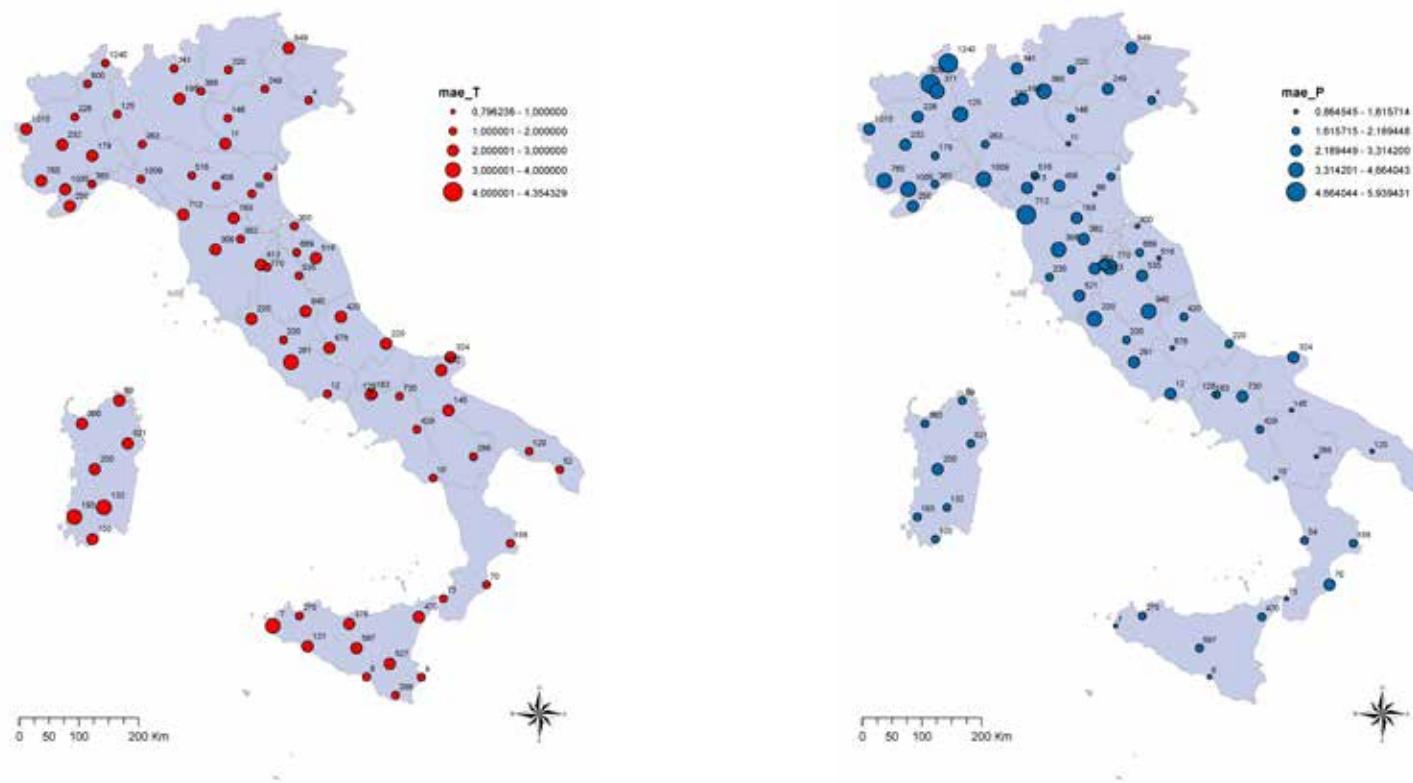


Figura 24 - Mappa dell'errore medio assoluto (Mae) per le temperature e le precipitazioni

Procedure di elaborazione per l'Atlante

Le informazioni presentate nell'atlante sono il risultato di elaborazioni effettuate a partire da valori di base giornalieri di temperatura minima, temperatura massima, precipitazione totale, umidità relativa diurna e umidità relativa notturna, stimati e attribuiti a ciascuna cella della griglia regolare georeferenziata in cui il territorio italiano è stato suddiviso (figura 25).

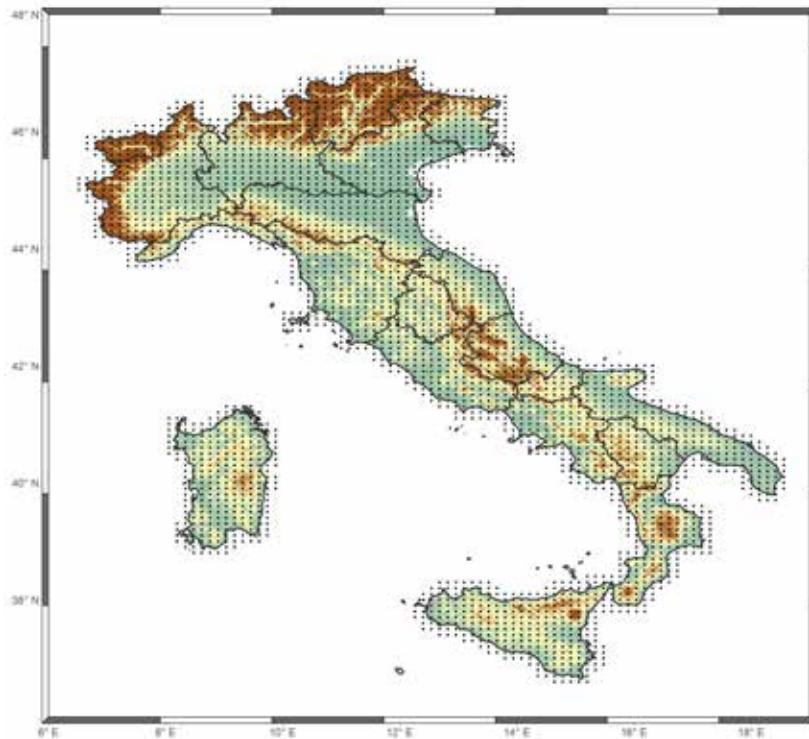


Figura 25 – Reticolato di riferimento rappresentato mediante il centroide di ciascuna cella

Come descritto nel capitolo precedente, a seguito dei controlli di validazione effettuati, si può affermare che i risultati della spazializzazione soddisfano i requisiti di affidabilità su tutto il territorio analizzato, caratteristica indispensabile per assicurare un'adeguata rappresentazione spaziale dei parametri e degli indici adottati per descrivere i lineamenti climatici dell'Italia.

Delle 9309 celle costituenti la griglia georeferenziata di analisi, 3193 intercettano il territorio nazionale e sono la base per tutte le elaborazioni effettuate nell'atlante. Ciascuna cella ha una risoluzione di 0,14° di Longitudine e 0,10° di Latitudine, corrispondente ad una dimensione di circa 10 km di lato (tabella VII).

Tabella VII: Caratteristiche della griglia di stima utilizzata per l'atlante

Dimensioni (n. righe, n. colonne, n. celle): 107, 87, 9309
Risoluzione (in gradi): 0,14; 0,1 (Long; Lat)
Estensione (in gradi) : 6,45E; 18,63E; 36,55N; 47,25N
Coordinate di riferimento: +proj=longlat +datum=WGS84
Celle Nulle: NA

Le serie di dati ricostruite si riferiscono al cinquantennio 1961-2010 e sono sufficientemente lunghe, omogenee e complete per gli scopi dell'atlante.

I dati di base sono stati aggregati a livello mensile, stagionale ed annuale ed elaborati per ottenere i valori medi dei trentenni ufficiali di riferimento attualmente in uso: 1961-1990 (Cli. No), 1971-2000 (clima recente) e 1981-2010 (clima attuale).

I risultati ottenuti per i tre periodi non possono essere direttamente confrontati tra loro, perché gli anni di sovrapposizione non consentono valutazioni statisticamente corrette sulle variazioni del clima. La scelta di pubblicare comunque i risultati ottenuti per i tre trentenni deriva dalla consapevolezza che, per gli studi sul clima, la comunità scientifica adotta l'uno o l'altro periodo climatico di riferimento e perciò si è ritenuto utile fornire un quadro comparativo, per quanto possibile ampio, sul clima degli ultimi cinquant'anni in Italia. In particolare per l'ultimo trentennio, che rappresenta il riferimento climatico valido per il decennio in corso, si è considerato opportuno fornire una cartografia più dettagliata rispetto agli altri due trentenni.

I valori di base di temperatura minima, temperatura massima e precipitazione totale sono attribuiti all'intervallo giornaliero h 00:00-24:00, mentre i valori di umidità relativa diurna e notturna si riferiscono rispettivamente agli intervalli orari 9:00-21:00 e 21:00-9:00.

Le indicazioni dell'OMM (WMO, 1989, 2011) suggeriscono di elaborare i valori mensili quando sia presente almeno l'80% dei valori giornalieri. Per l'atlante, si è scelto di procedere alle elaborazioni solo in presenza di almeno l'84% dei dati giornalieri nel periodo di analisi (mese, stagione, anno).

Per le elaborazioni stagionali (Inverno: dicembre, gennaio,

febbraio; Primavera: marzo, aprile, maggio; Estate: giugno, luglio, agosto; Autunno: settembre, ottobre, novembre) i valori sono stati aggregati nei tre mesi (valori medi o cumulati in funzione della grandezza meteorologica). Analogamente si è proceduto al calcolo dei valori annuali, aggregando i mesi da gennaio a dicembre. Successivamente, per ciascun trentennio, i valori medi di ogni mese, stagione e anno sono stati calcolati rispettivamente come media dei valori medi mensili, stagionali e annuali degli anni ricadenti nel trentennio considerato. Ad esempio, la temperatura media massima di gennaio relativa al periodo 1961-1990 rappresenta la media dei valori medi mensili dei trenta mesi di gennaio ricadenti nel trentennio; analogamente si è proceduto per tutte le altre grandezze e per l'elaborazione degli indici.

Indici climatici e agroclimatici

Oltre alle variabili climatiche citate in precedenza, sono stati calcolati alcuni indici che si ritengono essenziali per una caratterizzazione climatica e agroclimatica del territorio. Le elaborazioni, condotte sui due trentenni di riferimento 1961-1990 e 1981-2010, forniscono ulteriori indicazioni sulla variabilità spaziale e/o temporale del clima italiano. Sono stati calcolati i valori medi trentennali dei seguenti indici climatici:

– *Numero medio annuo di notti tropicali*. Numero medio di giorni per anno nel trentennio, in cui la temperatura minima è maggiore di 20 °C.

– *Numero medio annuo di giorni estivi*. Numero medio di giorni per anno nel trentennio, in cui la temperatura massima è maggiore di 25 °C.

– *Numero medio annuo di giorni con temperatura massima maggiore di 30 °C*. Numero medio di giorni per anno nel trentennio in cui la temperatura massima è superiore a 30 °C. Tale soglia è interessante per il territorio italiano perché nel periodo estivo viene superata numerose volte e per lunghi periodi.

Si fa presente che i primi due indici sono stati calcolati anche per ciascun anno del cinquantennio 1961-2010, come indicatori di cambiamento climatico rappresentati mediante grafici spazio-tempo nella sezione successiva.

Al fine di valutare le risorse climatiche disponibili per l'agricoltura e la loro capacità di soddisfare le esigenze delle colture, sono stati calcolati i valori medi trentennali dei seguenti indici agroclimatici:

– *Sommatorie termiche annue*. Rappresenta l'accumulo an-

nuale di valori di temperatura eccedenti soglie prestabilite, in questo caso 0, 5, 10, 15 e 20 °C. Tali valori consentono la parametrizzazione delle relazioni pianta-temperatura.

– *Evapotraspirazione potenziale totale mensile (ETP)*. Rappresenta l'ETP totale mensile, calcolata a partire dai valori giornalieri mediante l'equazione di Hargreaves-Samani. L'elaborazione è stata effettuata per i mesi da maggio ad agosto, in cui si hanno le maggiori criticità per le elevate esigenze idriche delle colture e gli scarsi apporti piovosi.

– *Bilancio idroclimatico mensile*. Rappresenta la differenza tra i valori mensili di precipitazione totale ed evapotraspirazione potenziale; consente di stimare le disponibilità idriche e le eventuali condizioni di siccità. È stato elaborato solo per i mesi da maggio ad agosto di ogni trentennio considerato.

Indicatori di cambiamento climatico

Allo scopo di evidenziare le tendenze in atto nel clima sul territorio nazionale e di tracciare un quadro generale della loro distribuzione spaziale e/o temporale, sono stati calcolati alcuni indici specifici ed è stata condotta l'analisi di discontinuità sulle serie di temperatura e precipitazione aggregate a livello nazionale.

Un aspetto fondamentale dei cambiamenti climatici risiede nelle variazioni di frequenza e/o intensità degli estremi climatici, fattori che possono incidere profondamente sulla natura e sulla società. Il riferimento internazionale per la valutazione di questi cambiamenti è l'Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), che ha proposto un insieme di 27 indici essenziali o *core indices*, basati sui valori giornalieri di temperatura (massima e/o minima) o di precipitazioni (Karl, et al. 1999; Peterson, 2001; Zhang et al., 2005). Ogni indice descrive un determinato carattere del clima ed è definito mediante una funzione specifica che utilizza quasi sempre dei valori soglia di confronto, che possono essere prefissati (di validità generale) oppure variabili a livello locale. In quest'ultimo caso le soglie sono definite in termini di percentili delle distribuzioni locali nel periodo di riferimento (1961-1990). Un gruppo di questi indici introduce anche un periodo minimo, pari a sei giorni, di persistenza del fenomeno oltre il valore soglia del percentile. Altri indici di tipo diverso completano la descrizione dei caratteri del clima.

Fra tutti gli indici suggeriti dall'ETCCDI sono stati scelti quelli più significativi per il nostro ambito geografico di

applicazione; per ogni anno del cinquantennio 1961-2010 sono stati calcolati:

- *Notti tropicali (TR)*. Numero di giorni in cui la temperatura minima è maggiore di 20 °C.
- *Giorni estivi (SU)*. Numero di giorni in cui la temperatura massima è maggiore di 25 °C.
- *Escursione termica giornaliera (DTR)*. Media annua della differenza tra la temperatura massima e la temperatura minima giornaliera.
- *Periodi di caldo (WSDI)*. Numero di giorni appartenenti a periodi di almeno sei giorni consecutivi in cui la temperatura massima è maggiore del valore soglia del 90° percentile.
- *Periodi di freddo (CSDI)*. Numero di giorni appartenenti a periodi di almeno sei giorni consecutivi in cui la temperatura minima è inferiore al valore soglia del 10° percentile.
- *Durata della stagione vegetativa (GSL)*. Numero di giorni tra il primo evento con almeno 6 giorni consecutivi con temperatura media giornaliera maggiore di 5 °C e la prima occorrenza, dopo il 1° luglio, di almeno 6 giorni consecutivi con temperatura media giornaliera minore di 5 °C. (Periodo compreso tra 1° gennaio e 31 dicembre, nell'emisfero Nord).
- *Giorni caldi (TX90p)*. Percentuale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al 90° percentile.
- *Notti calde (TN90p)*. Percentuale di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è superiore al 90° percentile.
- *Giorni freddi (TX10p)*. Percentuale di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è inferiore al 10° percentile.
- *Notti fredde (TN10p)*. Percentuale di giorni in cui la temperatura minima giornaliera è inferiore al 10° percentile.
- *Precipitazione massima giornaliera (Rx1day)*. Valore massimo di precipitazione giornaliera registrato nell'anno, espresso in millimetri.
- *Intensità di pioggia giornaliera (SDII)*. Precipitazione media nei giorni piovosi (precipitazioni di almeno 1 mm), calcolata come rapporto tra la precipitazione totale annua di tutti i giorni piovosi e il numero di giorni piovosi nell'anno, espressa in millimetri/giorno.
- *Numero di giorni con precipitazione intensa (R10mm)*. Numero di giorni nell'anno con precipitazione di almeno di 10 mm.
- *Precipitazione totale nei giorni molto piovosi (R95p)*. Quantità totale delle precipitazioni giornaliere superiori al 95° percentile nell'anno, espressa in millimetri.

Analisi di discontinuità delle serie meteorologiche

Per evidenziare la presenza di eventuali mutamenti nel clima è stata, inoltre, condotta l'analisi dei *change points* (punti di discontinuità), che si basa sulla ricerca di punti lungo la serie storica di dati (in genere anni o stagioni), nei quali si registra un cambiamento nella struttura della serie stessa, vale a dire un salto rispetto al valore medio oppure un cambiamento nella struttura di variabilità.

In generale, si può parlare di "cambiamento climatico" quando si è in presenza di una variazione nella distribuzione statistica di una specifica variabile climatica. In termini più formali, una variazione della variabile climatica $\{y_t\}$ nel periodo $t = 0, 1, 2, \dots, \infty$ si ha se la variabile in questione è *non stazionaria*. La *non stazionarietà* di una variabile discende dal mancato rispetto di una delle seguenti condizioni:

- 1) il valore atteso $E\{y_t\} = \mu < \infty$;
- 2) la varianza $V\{y_t\} = E\{(y_t - \mu)^2\} = \gamma_0 < \infty$;
- 3) la covarianza $Cov\{y_t, y_{t-k}\} = E\{(y_t - \mu)(y_{t-k} - \mu)\} = \gamma_k$ per $k = 1, 2, 3, \dots$, ossia è costante per ciascun valore di k .

D'altro canto, una serie storica stazionaria solitamente converge al suo valor medio di lungo termine dopo uno shock di natura stocastica.

In particolare, è stata effettuata un'indagine per chiarire gli aspetti relativi alla stazionarietà delle variabili climatiche di precipitazione e temperatura aggregate a livello nazionale e ad una scala temporale annuale. La base di dati è costituita dalle serie storiche dei valori annuali di cumulo di precipitazione, di temperatura massima e temperatura minima mediati sull'intero territorio italiano per il periodo 1961-2010.

I metodi utilizzati a questo scopo sono di diverso tipo e basati sul concetto di regressione lineare: *flat steps model* (Bai e Perron, 2003) e *piece-wise linear regression* (Tom e Miranda, 2004). I due metodi possono essere adottati congiuntamente, tuttavia in questo studio è stato applicato soltanto il primo metodo. Il modello utilizzato, come gli altri modelli *flat steps* (a gradini) per l'individuazione di discontinuità di una serie storica, si basa sul modello di regressione lineare.

Come primo passo sono stati utilizzati dei test per verificare la presenza di discontinuità nella serie (*empirical fluctuation test* oppure test basati sulla minimizzazione della somma dei residui). In particolare sono stati applicati l'OLS-CUSUM test e l'F-Test con la statistica $\sup F$. Nel caso in cui entrambi i test hanno segnalato la presenza di punti di discontinuità nella serie

storica si è proceduto all'individuazione del numero ottimale di tali punti tramite una procedura iterativa basata sul modello di regressione lineare. Più dettagliatamente, sono stati stimati i coefficienti di regressione spostando il punto di discontinuità lungo tutto l'asse temporale della serie storica e si è valutato il punto ottimale per suddividere la serie in due tronconi e stimare due differenti modelli per ciascun troncone. La stessa procedura si è ripetuta più volte, aumentando iterativamente il numero di punti di discontinuità e stimando i modelli di regressione per tutti i tronconi della serie storica così definiti. In questo modo è stato stabilito il numero ottimale di punti di discontinuità della serie, sulla base degli indici RSS (*Residuals Sum of Squares*) e BIC (*Bayesian Information Criterion*).

Una volta individuato il numero ottimale di punti di discontinuità, sono stati stimati i coefficienti di regressione e, per verificare la correttezza del modello così definito, sono stati applicati i seguenti test:

1. test t di Student per verificare che la media dei residui non sia significativamente diversa da zero;
2. test di Shapiro-Wilk per verificare che la distribuzione dei residui sia di tipo Normale;
3. test di Breusch-Pagan per verificare che la varianza dei residui sia costante (omoschedasticità);
4. test di Durbin-Watson per escludere la presenza di correlazione seriale nei residui (autocorrelazione).

Si segnala che l'approccio seguito nell'analisi non permette di descrivere i fenomeni e le tendenze locali, ma esclusivamente di evidenziare tendenze generali a livello nazionale.

I software utilizzati

Per la gestione e l'elaborazione dei dati meteorologici, delle grandezze e degli indici climatici rappresentati nell'Atlante, è stato utilizzato il software statistico *open source* R (R Core Team, 2014) avvalendosi delle librerie specifiche per analisi di serie storiche di dati territoriali (gstat, rgdal, raster, rts), per elaborazioni di indici climatici dell'ETCCDI, climdex.pcic è stata inoltre utilizzata la libreria spgrass6 per richiamare i moduli del software GRASS GIS nella versione 6.4.3. (*Geographic Resources Analysis Support System*), un sistema informativo geografico per la gestione dei dati, l'elaborazione di immagini, la produzione grafica e la modellazione spaziale. GRASS è un software libero a codice aperto rilasciato sotto licenza GNU *General Public License* (GPL) ed è un progetto della Open source Geospatial Foundation (www.grass.fbk.eu).

Sistema di riferimento

Le mappe dell'Atlante sono state realizzate utilizzando il sistema di coordinate geografiche geodetico globale WGS84 (World Geodetic System 1984) in cui le grandezze angolari latitudine e longitudine sono espresse in gradi. La scelta è stata dettata dalla volontà di rendere *open source* i dati elaborati per permettere a qualunque utente di inserire i dati nel sistema di proiezione che ritiene più idoneo ad ottenere la migliore approssimazione cartografica dell'area che vuole rappresentare.

Rappresentazione dei risultati

La parte del volume che raccoglie tutti i risultati delle elaborazioni descritte in questo capitolo è strutturata in diverse sezioni contenenti mappe tematiche, grafici e tabelle.

Una prima serie di mappe, articolata in tre sezioni (una per trentennio), presenta la distribuzione spaziale delle variabili climatiche di base a differenti risoluzioni temporali.

Per il trentennio 1981-2010 sono rappresentate le medie mensili, stagionali e annuali delle temperature (minima, massima e media) e della precipitazione totale, le medie stagionali dell'escursione termica e l'umidità relativa nei suoi valori medi diurni e notturni dei mesi di gennaio e luglio. Per i trentenni 1971-2000 e 1961-1990 sono rappresentate solo le medie stagionali e annuali delle temperature (minima, massima e media) e della precipitazione totale.

Un secondo gruppo di mappe illustra la distribuzione delle medie trentennali degli indici climatici e agroclimatici descritti in precedenza, elaborati solo per i due trentenni di riferimento 1981-2010 e 1961-1990.

Nella sezione *Indicatori di cambiamento climatico*, per gli indici climatici i risultati sono presentati sia con una serie di mappe annuali che illustrano il valore assunto nel periodo 2001-2010 sia con un grafico spazio-temporale relativo al cinquantennio 1961-2010. Si tratta di grafici di Hovmöller, che riportano per ogni passo di latitudine del territorio nazionale (pari a 0,1° e corrispondente all'ampiezza in latitudine di ciascuna cella della griglia) il valore mediano assunto dall'indice ogni anno nell'arco di tutto il cinquantennio. Questi elaborati permettono di evidenziare facilmente sia i trend geografici (in ascisse) lungo la latitudine, che nel nostro Paese sono prevalenti, sia quelli temporali (in ordinate) degli indici calcolati e di avere una visione di insieme del fenomeno per l'intero periodo. Per alcuni indici sono riportati solo i grafici di Hovmöller.

Nella stessa sezione sono illustrati i risultati dell'analisi dei *change points*, sia con grafici di sintesi sia con un breve testo di commento relativo ai test di significatività condotti.

L'ultima parte del volume *Tabelle climatiche per aree geografiche* presenta in forma tabellare i risultati delle elaborazioni. Un primo gruppo di tabelle riporta i valori medi mensili e annuali di temperatura minima, massima e precipitazione cumulata relativi al trentennio 1981-2010, aggregati a livello di provincia e regione in base ai limiti amministrativi ISTAT 2011 (<http://www.istat.it/it/archivio/104317>). A queste seguono le tabelle sugli indici di cambiamento climatico considerati nell'atlante che ne riportano i valori mediani ed estremi, elaborati per l'ultimo trentennio e aggregati a livello regionale.

Bibliografia

Agassiz L., 1840. *Etudes sur les glaciers*. Neuchatel, Agassiz, Jent & Gassmann.

Amoretti C., 1796. *Sul cangiamento del clima avvenuto in Italia e specialmente in Lombardia*. In Opuscoli scelti sulle scienze e sulle arti tratti dagli Atti delle Accademie, e dalle altre Collezioni filosofiche, e letterarie, e dalle opere più recenti inglesi, tedesche, francesi, latine, e italiane, e da manoscritti originali, e inediti, t. 19, 405-419.

Andrews D. W. K., 1993. *Tests for parameter instability and structural change with unknown change point*. *Econometrica* 61: 821-856.

Angot A., 1885. *Étude sur les vendanges en France*. *Annales du Bureau Central Météorologique de France*, année 1883, t. 1. B, 29-120.

Arago J. F. D., 1833. *Notices scientifiques ... sur l'état thermométrique du globe terrestre*. *Annuaire pour l'an 1834, présenté au roi, par le Bureau des Longitudes*, 171-240.

Arrhenius S. A., 1896. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground*. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41, 237-276.

Bacon F., 1625. *The Essayes or, Counsels, ciuill and morall*. London, Iohn Haviland.

Bai J., Perron P., 2003. *Computation and Analysis of Multiple Structural Change Models*, *Journal of Applied Econometrics*, 18, 1-22.

Bellani A., 1834. *Sul cangiamento del clima: considerazioni*. *Giornale agrario Lombardo – Veneto e continuazione degli Annali universali di agricoltura, di industria e d'arti economiche*, serie 2, vol. 2, 69-94.

Bellani A., 1836. *Sul clima: altre considerazioni*. *Giornale agrario Lombardo – Veneto e continuazione degli Annali universali di agricoltura, di industria e d'arti economiche*, serie 2, vol. 6, 202-207.

Behringer W., 2013. *Storia culturale del clima: Dall'era glaciale al riscaldamento globale*. [traduzione di Corrado Bertani], Torino, Bollati Boringhieri.

Bilancini R., 1950. *L'aumento della temperatura della terra*. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, anno 10, 4, 3-16.

Brázdil R., Pfister C., Wanner H., Storch H., Luterbacher J., 2005. *Historical Climatology in Europe: The state of the art*. *Climatic Change*, vol. 70, 3, 363-430.

Brooks C. E. P., 1922. *The evolution of climate* [with a preface by G. C. Simpson]. London, Benn Brothers.

Brooks C. E. P., 1926. *Climate through the ages: A study of the climatic factors and their variations*. London, Ernest Benn.

Brückner E., 1890. *Klima-Schwankungen seit 1700, nebst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit*. Wien, Ed. Hölzel.

Budyko M. I., 1958. *Heat Balance of the Earth's Surface* [translated by Nina A. from "Teplovoï balans zemnoï poverkhnosti"]. Washington, U.S. Dept. of Commerce, Weather Bureau.

Camuffo D., 1990. *Clima e uomo*. Milano, Garzanti.

Callender G. S., 1938. *The Artificial Production of Carbon Dioxide and its Influence on Temperature*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 64, 233-240.

Cantù V. e Narducci P., 1967. *Lunghe serie di osservazioni meteorologiche*. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, anno 27, 71-79.

Cantù V., 2004. *Meteorologia. Climatologia. Cambiamenti di clima: Storia della meteorologia nel sec. XX in tre saggi* (collana «Quaderni di geofisica»). Roma, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Castellani G., 1818. *Ricerche sull'aumento delle piogge e sul raffreddamento del clima* [...] Torino, presso Gaetano Balbino librajo in Dora-Grossa.

Castriota F., 1948. *Le estati molto calde; Gli inverni caldi; La temperatura della Terra aumenta*. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, anno 8, n. 2, 63-64, n. 3, 44-45, 52-53.

Celoria G., 1873. *Se nella media temperatura annua, e se nella quantità di pioggia che cade esista un periodo sincrono a quello delle macchie solari*. *Rendiconti dell'Istituto lombardo di Scienze Lettere*, nuova serie, vol. 6, fasc. 2, 41-48.

Chamberlin T. C., 1897. *A Group of Hypotheses bearing on Climatic Changes*. *The Journal of Geology*, vol. 5, n. 7, 653-683.

Chilés J-P., Delfiner P., 1999. *Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York, 695 p.

Chilés J-P., Delfiner P., 2012. *Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty*. 2nd Edition. Wiley, New York. P. 734. ISBN: 978-0-470-18315-1.

Chiminello V., 1776. [...] *Non possiamo sapere per mezzo di osservazioni Meteorologiche se nell'estensione di tutta l'Europa l'acqua che cade in pioggia ai giorni nostri sia in maggiore o minor quantità di quella che cadesse ne' secoli a noi più rimoti; si cerca però sapere la verità del fatto per mezzo di ragioni fisiche, e quali utilità ricavar si potrebbero dalla scienza de' fatti per la*

coltivazione de' terreni. Padova, nella Stamperia del Seminario.

Cotte L., 1774. *Traité de météorologie* [...]. Paris, de l'imprimerie Royale.

Croll J., 1864. *On the physical cause of the change of climate during geological epochs*. Philosophical Magazine, 28, 121-137.

Croll J., 1875. *Climate and Time in Their Geological Relations: A theory of secular changes of the earth's climate*. London, Daldy, Ibster & C.

De Marchi L., 1895. *Le cause dell'era glaciale: ricerca teorica delle condizioni che determinano l'attuale distribuzione delle temperature e delle piogge sulla superficie terrestre e che possono averla modificata nei precedenti periodi geologici*. Pavia, Tip. Fratelli Fusi.

De Marchi L., 1928. *Sulla variazione dei climi: Relazione illustrativa delle proposte presentate dal Comitato Geografico Nazionale Italiano al Congresso Internazionale di Cambridge (Luglio 1928)*. Firenze, IGM.

De Marchi L., 1930. *Projet d'une étude à la collaboration internationale sur les variations des climats*. In International Geographical Congress, Cambridge, July 1928. Report of the Proceedings, 200-203.

De Marchi L., 1931. *Per la organizzazione di una raccolta di documenti riguardanti le variazioni dei climi italiani*. In: Comptes Rendus du Congrès International de Géographie, Paris 1931, t. 2, 223-227.

De Marchi L., 1936. *Commission internationale pour l'étude des variations de climat en époque historique*. In: Comptes Rendus du Congrès International de Géographie, Varsovie 1934, t. 2, 633-635.

Desiato F., Fioravanti G., Frascchetti P., Perconti W., Piervitali E., 2015. *Valori normali di temperatura e precipitazione in Italia*. ISPRA, Stato dell'Ambiente 55/2014, ISBN 978-88-448-0689-7.

Dionysius Halicarnassensis, 1824. *Le antichità romane* [...] volgarizzate dall'ab. Marco Mastrofini. tomo terzo, Milano, dalla tipografia de' Fratelli Sonzogno.

Dufour L., 1870. *Notes sur le problème de la variation du climat*. Bulletin de la Société Vaudoise de Sciences Naturelles, n. 63, vol. 10, 359-436.

Douglass A. E., 1919. *Climatic cycles and tree growth: A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity*. Washington, Carnegie Institution of Washington.

Emiliani C., 1955. *Pleistocene temperatures*. The Journal of Geology, 63, n. 6, 538-578.

Emiliani C., 1966. *Paleotemperature analysis of Caribbean*

cores P6304-8 and P6304-9 and generalized temperature curve for the past 425.000 years. The Journal of Geology, vol. 74, n. 2, 109-126.

Eredia F., 1909. *La temperatura dell'aria in Italia*. Annali del R. Ufficio Centrale di Meteorologia e Geodinamica", volume 31.

Eredia F., 1915. *Le Variazioni del clima in Italia*. In Atti del X Congresso Internazionale di Geografia, Roma 1913, 792-813.

Fleming J. R., 1998. *Historical perspectives on climate change*, New York, Oxford University Press.

Fourier J. B. J., 1824. *Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*. Annales de Chimie et Physique, séries 2, 27, 136-167.

Fourier J. B. J., 1827. *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institute de France, séries 2, 7, 569-604.

Gazzola A., 1968. *Osservazioni sull'evoluzione del clima negli ultimi decenni*, Rivista di Meteorologia Aeronautica, anno 28, n. 3, 62-63.

Georgiadis T., Mariani L., 2006. *Clima e cambiamento climatico: I. Profilo storico, atmosfera e clima, variabilità del clima, ruolo delle nubi*. Rivista Italiana di Agrometeorologia, 1, 4-18.

Giacobbe A., 1961. *Le variazioni della temperatura atmosferica in Italia negli ultimi sessant'anni*. Rivista Geografica Italiana, anno 68, n. 4, 352-366.

Hann J., 1883. *Handbuch der Klimatologie*, Stuttgart, J. Engelhorn.

Hellmann G., 1921. *Die Meteorologie in den deutschen Flugschriften und Flugblättern des XVI. Jahrhunderts*. Abhandlungen der Preußischen Akademie der Wissenschaften, Physikalisch-mathematische Klasse, 1.

Hollar S., 2013. *Pioneers in the world of weather and climatology*. New York (NY), Britannica Educational Pub.

Huntington E., 1917. *Climatic change and agricultural exhaustion as elements in the fall of Rome*. Quarterly Journal of Economics, n. 2, 173-208.

Huntington E. and Visheh, S. S., 1922. *Climatic Changes: their nature and causes*. New Haven, Yale University Press.

Iafrate L., 2008. *Fede e scienza: un incontro proficuo. Origini e sviluppo della meteorologia fino agli inizi del '900*. Roma, Ateneo Pontificio Regina Apostolorum.

Iafrate L., Esposito S., Beltrano M. C., 2014. *Historical development of the "Climate Change" concept in Italy: The most original and significant works in the past four centuries*. In Atti del

XVII Convegno Nazionale di Agrometeorologia, Roma 10-12 giugno 2014. *Italian Journal of Agrometeorology*, 13-14.

Karl, T.R., N. Nicholls, and A. Ghazi, 1999. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, 42, 3-7.

Lamb H. H., 1977. *Climate: Present, Past and Future*, vol. 2, *Climatic history and the future*, London, Methuen.

Le Roy Ladurie E., 1967. *Histoire du climat depuis l'an mil*. Paris, Flammarion.

Libertà A. e Girolamo A., 1992. *Time coregionalization model for the analysis of meteorological fields: application in northern Italy*. Meeting 2nd CODATA Conference on Geomathematics and Geostatistics. *Science de la Terre, Sér.Inf. Nancy*, 31, pp. 93-119.

Libri G., 1830. *Mémoire sur la détermination de l'échelle du thermomètre de l'Académie del Cimento*. *Annales de Chimie et de Physique*, t. 45, 354-361.

Lorenz E. N., 1963. *Deterministic Nonperiodic Flow*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 20, 130-141.

Malaspina F., 2007. *Quando il ritiro dei ghiacciai era normale*. Svipop: sviluppo e popolazione. Disponibile su: <http://www.svipop.org/ricercaArticoloAreeTem.php?idArt=281&bckLink=recordinizio%253D229>.

Manabe S., Wetherald R. T., 1967. *Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 24, 3, 241-259.

Manabe S., Kirk Bryan, 1969. *Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model*. *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 26, 786-789.

Matheron G., 1970. *La Théorie des Variables Régionalisées et ses Applications*. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique. Ecole des Mines de Paris.

Matheron G., 1982. *La destructure des hautes teneurs et le krigeage des indicatrices*. Technical Report N-761, Ecole des mines de Paris, Fontainebleau.

Matheron G., 1989. *Estimating and choosing: an essay on probability in practice*. Springer-Verlag, Berlin.

Melloni M., 1833. *Mémoire sur la transmission libre de la chaleur rayonnante par différents corps solides et liquides*. [Parigi], Imprimerie de Madame Veuve Thuau.

Milanković M., 1920. *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire*. Parigi, Gauthier-Villars.

Mori A., 1962. *Progetto per un Atlante Climatico d'Italia*. In

Atti del XVIII Congresso Geografico Italiano - Trieste 4-9 aprile 1961, Istituto di Geografia dell'Università, Trieste.

Orombelli G., 1982. *La paleoclimatologia: Brevi cenni introduttivi*. In Atti del Primo Convegno di Meteorologia Appenninica, Reggio Emilia, 7-10 aprile 1979, 589-611.

Peterson T.C., Folland C., Gruza G., Hogg W., Mokssit A. e Plummer N., 2001. *Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001*. WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneve, Switzerland, 143pp.

Pinna M., 1969. *Le variazioni del clima in epoca storica e i loro effetti sulla vita e le attività umane: un tentativo di sintesi*. *Bollettino della Società Geografica Italiana*, serie 9, anno 10, n. 4/6, 198-275.

Pinna M., 1996. *Le variazioni del clima. Dall'ultima grande glaciazione alle prospettive per il XXI secolo*, Milano, Franco Angeli.

Plass G. N., 1956. *Effect of Carbon Dioxide Variations on Climate*. *American Journal of Physics*, 24, 376-387.

Plinius Secundus G., 1573. *Historia naturale*, tradotta per M. Lodovico Domenichi. Vinegia [Venezia], appresso Giacomo Vidali.

Polli, S., 1950. *Il ciclo climatico di 8 anni e sua realtà fisica*. *Annali di geofisica*, anno 3, n. 1, 63-76.

Revelle R. R. D., Suess H., 1957. *Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades*. *Tellus*, 9, 18-27.

Rosini E., 1988. *Introduzione all'agroclimatologia. Parte prima: Le basi della climatologia*. Bologna, ERSA-Servizio Meteorologico Regionale.

Ruggieri G. C., 1983. *Gas carbonico e variazioni climatiche*. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, anno 43, n. 1/2, 89-98.

Schiaparelli G. V., 1868. *Le variazioni dell'eccentricità del grand'orbe, ed i climi terrestri nelle epoche geologiche*. *Rendiconti del Reale Istituto Lombardo di Scienze e Lettere*, 1868, serie 3, v. 1, 881-889, 915-928.

Secchi A., 1870. *Le soleil: Exposé des principales découvertes modernes sur la structure de cet astre, son influence dans l'univers et ses relations avec les autres corps célestes*. Paris, Gauthier-Villars.

Targioni Tozzetti G., 1767. *Alimurgia o sia Modo di render meno gravi le carestie proposto per sollievo de' poveri*. Firenze, per il Moücke.

Toaldo G., 1802. *Completa raccolta di opuscoli, osservazio-*

ni, e notizie diverse contenute nei Giornali astro-meteorologici dall'anno 1773 sino all'anno 1798. Venezia, presso Francesco Andreola, t. 2, 82-106.

Todaro C., 1964. *Sull'andamento delle temperature medie estive a Milano*. Rivista di Meteorologia Aeronautica, anno 24, n. 2, 50-51.

Tom A.R., Miranda P.M.A., 2004. *Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters*, Geophys Res Lett 31, L02207.

Tyndall J., 1863. *On the passage of radiant heat through dry and humid air*. Philosophical Magazine, series 4, vol. 26, 172, 44-54.

Vento D., 2002. *Ricordo del prof. Ezio Rosini, Parma 1914 – Roma 2002*. AIAM news: Notiziario dell'Associazione Italiana di Agrometeorologia, anno 6, n. 2, 1-2. Disponibile su: http://www.agrometeorologia.it/documenti/rivista2000_2003/news2_02.pdf.

Ventrelli M., 1793. *Memoria su le cagioni della scarsezza delle piogge nella Puglia piana: esaminate secondo le più recenti cognizioni*. S.l, s.n.

Vercelli F., 1940. *Guida per l'analisi delle periodicità nei diagrammi oscillanti*. Venezia, Tip. C. Ferrari.

Wachernagel H., 2004. *Géostatistique et assimilation séquentielle de données*. Mémoires des Sciences de la Terre n. 02.

WMO, 1961. *WMO bibliography on climatic fluctuations. Bibliographie de l'OMM sur les fluctuations climatiques*. Geneva, Secretariat of the World Meteorological Organization.

WMO, 1963. *Changes of climate: Proceedings of the Rome Symposium organized by Unesco and the World Meteorological Organization [2-7 October 1961]*, Paris, UNESCO. Disponibile su: <http://unesdoc.unesco.org/images/0006/000698/069895mo.pdf>

WMO, 1966. *Climatic change: Report of a working group of the Commission for Climatology*. Technical notes/World Meteorological Organization, n. 79, Geneva, Secretariat of the World Meteorological Organization.

WMO, 1989. *Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals*. WMO/TD No. 341, WCDP-No. 10. Geneva.

WMO, 1991. *Climate change: the IPCC response strategies*. Washington, Island Press.

WMO, 1992. *International Meteorological Vocabulary*. WMO/OMM/BMO No 182 – Ginevra 1992 ISBN 92-63-02182-1.

WMO, 2007. *The Role of Climatological Normals in a Changing Climate*. WMO/TD-No. 1377, WCDMP-No. 61. Geneva.

WMO, 2011. *Guide to Climatological Practices No. 100*. Geneva.

WMO, 2012. *Technical Regulations, Basic documents no. 2, Vol. I – General Meteorological Standards and Recommended Practices*. WMO-No. 49. Geneva.

Zhang, X., G. Hegerl, F. Zwiers, J. Kenyon, 2005. *Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes*. J. Climate, 18, 1641-1651. (<http://dx.doi.org/10.1175/JCLI3366.1>)

