

Siccità, scarsità e crisi idriche

Il contributo della ricerca
a supporto della definizione
del bilancio idrico

A cura di
Emanuele Romano
Ivan Portoghese



HABITAT SIGNA

Studi e ricerche su sistema terra e ambiente

collana del
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente

diretta da
Francesco Petracchini

comitato scientifico a cura del consiglio scientifico di dipartimento
Andrea Billi, Claudio Faccenna, Gian Luigi Liberti, Andrea Rinaldo, Sabrina Speich

comitato editoriale
Sara Di Marcello, Maria Elena Martinotti

ideazione del nome e design della collana
Lucia Caraffa

Siccità, scarsità e crisi idriche

Volume 1 della collana HABITAT SIGNA

editing
Sara Di Marcello, Ivan Portoghese, Emanuele Romano, Angelica Zonta

impaginazione e copertina
Lucia Caraffa

graphical abstract
Matteo Tucci
www.luminescentia.com

crediti fotografici

Copertina e pag. 4 - Greg Montani, Pixabay.com; pagg. 20, 27, 562 - Carolyn, Pexels.com; pag. 238 - George Becker, Pexels.com; pagg. 477 e 512 - Frank Cone, Pexels.com; pag. 482 - FOX, Pexels.com; pag. 495 - Teono123, Pexels.com
Freepik.com: pagg. 30, 47, 50, 56, 68, 70,75, 86, 89, 96, 99, 104, 118, 121, 202, 212, 258, 268, 278, 284, 301, 303, 304, 311,325, 328, 339, 347, 350, 357, 366, 369, 384, 388, 391, 397, 406, 401, 402, 432, 426, 438, 440, 461, 480, 513, 514, 517, 518, 523, 541.
L'Editore è a disposizione degli aventi diritto per eventuali inesattezze nella citazione delle fonti.

© Cnr Edizioni, 2024

P.le Aldo Moro 7
00185 Roma
www.edizioni.cnr.it

ISSN 3035-2290

ISBN (ed. stampa) 978 88 8080 673 8

ISBN (ed. digitale) 978 88 8080 674 5

DOI <https://doi.org/10.69115/habitatsigna-2024-1>



This work is licensed under CC BY-SA 4.0



Siccità, scarsità e crisi idriche

Il contributo della ricerca
a supporto della definizione
del bilancio idrico

A cura di
Emanuele Romano
Ivan Portoghese



Indice

[5](#)
[21](#)

Prefazioni
Introduzione

[29](#)

1

Il bilancio idrologico, la disponibilità di risorsa idrica e il bilancio idrico

a cura di **Stefano Mariani**
Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA)

[49](#)

2

La governance dell'acqua in Italia

a cura di **Gerardo Sansone**
Presidenza del Consiglio dei ministri

[73](#)

3

Previsione, prevenzione e contrasto delle crisi idriche: il valore aggiunto della conoscenza tecnico-scientifica nelle attività di protezione civile

a cura di **Andrea Duro**
Dipartimento della protezione civile

[103](#)

4

Il regime meteo-climatico

a cura di **Stefano Federico**
CNR - Istituto di scienze dell'atmosfera e del clima (ISAC)

[145](#)

5

La criosfera

a cura di **Fabrizio de Blasi**
CNR - Istituto di scienze polari (ISP)

[201](#)

6

Il suolo e la zona insatura

a cura di **Marco Berardi**
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[237](#)

7

Acque superficiali e invasi

a cura di **Luca Brocca**
CNR - Istituto di ricerca per la protezione idrogeologica (IRPI)

[267](#)

8

Acque sotterranee

a cura di **Cristina di Salvo**
CNR - Istituto di geologia ambientale e geingegneria (IGAG)
Matia Menichini
CNR - Istituto di geoscienze e georisorse (IGG)

[327](#)

9

Interazione acque continentali - acque marine

a cura di **Christian Ferrarin**
CNR - Istituto di scienze marine (ISMAR)

[349](#)

10

Le risorse idriche non convenzionali

a cura di **Domenica Mosca Angelucci**
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[386](#)

11

Gli utilizzi idrici e la gestione sostenibile delle risorse

a cura di **Marco Lauteri**
CNR - Istituto di ricerca sugli ecosistemi terrestri (IRET)
Emanuele Romano e **Ivan Portoghese**
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[475](#)

12

Siccità ed ecosistemi

a cura di **Fabrizio Stefani**
CNR - Istituto di ricerca sulle acque (IRSA)

[513](#)

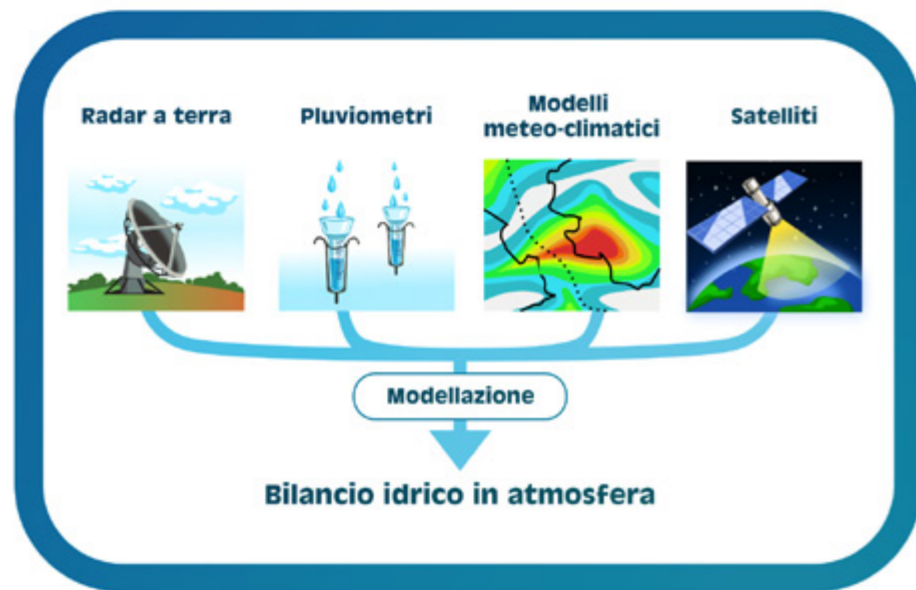
13

Siccità e Land Degradation

a cura di **Vito Imbrenda**
CNR - Istituto di metodologie per l'analisi ambientale (IMAA)

[554](#)

Conclusioni



Keywords
atmosphere
observations of atmospheric parameters
climate and meteorological models
climate change
atmospheric water balance

Parole-chiave
atmosfera
osservazioni dei parametri atmosferici
modelli meteorologici e climatici
cambiamento climatico
bilancio idrico in atmosfera

Curatore
Stefano Federico
CNR
Istituto di scienze dell'atmosfera
e del clima

Con contributi di
CNR
Istituto di ricerca
per la protezione idrogeologica
Roberto Coscarelli

CNR
Istituto di scienze
dell'atmosfera e del clima
Daniele Mastrangelo
Giulia Panegrossi
Rosa Claudia Torcasio

Presidenza del Consiglio dei ministri
Dipartimento della protezione civile
Gianfranco Vulpiani

Per le immagini fornite e
per il supporto nella stesura dei testi,
gli Autori desiderano ringraziare:
Emanuela Piervitali
ISPRA

Il regime meteo- climatico

4.1 Introduzione	105
4.1.1 Il bilancio idrico in atmosfera	105
4.1.2 Il clima del Mediterraneo	105
4.1.3 Il clima d'Italia	107
4.2 Monitoraggio	109
4.2.1 Le stazioni di superficie	109
4.2.2 Il radar meteorologico	112
4.2.3 Le osservazioni satellitari	114
4.2.4 Le stime di pioggia da satelliti	116
4.2.5 Analisi meteorologiche	119
4.3 Regime progresso e stato attuale	122
4.3.1 Andamento delle temperature	123
4.3.2 Andamento della precipitazione	124
4.4 Cambiamento climatico	128
4.5 Strumenti modellistici di analisi e previsionali	130
4.5.1 Il quadro generale	130
4.5.2 I modelli climatici	131
4.5.3 Le previsioni	134
<i>Sub-seasonal to Seasonal (S2S)</i>	
4.5.4 Le previsioni deterministiche	136
4.5.5 Il ruolo dell'intelligenza artificiale	137
4.6 Le domande di ricerca	138
4.7 Referenze bibliografiche	139

Introduzione

4.1

4.1.1 Il bilancio idrico in atmosfera

Il bilancio idrico in atmosfera, chiamato anche bilancio idroclimatico, è dato dalla differenza tra la precipitazione e l'evapotraspirazione. Quest'ultima misura il passaggio di vapore dalla superficie terrestre all'atmosfera ed è la somma di due contributi: il primo è l'evaporazione diretta dell'acqua (ad esempio l'evaporazione del mare), il secondo è il passaggio dell'acqua dalla superficie all'atmosfera tramite le piante (evapotraspirazione). Quest'ultima dipende, a sua volta, da parametri meteorologici, da fattori pedologici (potenziale idrico dell'acqua del terreno) e dalla vegetazione. L'evapotraspirazione è normalizzata, per convenzione, con la scelta di una coltura di riferimento che è rappresentata da un prato di *Festuca Arundinacea*, uniformemente ricoprente un terreno, in condizioni ottimali d'umidità e regolarmente sfalcato a un'altezza di 8-15 cm. Inoltre, il terreno deve essere tenuto in condizioni di

rifornimento idrico ottimali così da evitare la variabilità dovuta alle fluttuazioni di contenuto idrico che si verificano in esso. In questo modo, l'evapotraspirazione diventa indipendente dalle colture e da fattori pedologici e diventa funzione solo dei parametri meteorologici. Questi ultimi sono: la temperatura, la radiazione solare globale, il vento e l'umidità relativa. Si parla, quindi di evapotraspirazione potenziale, indicata solitamente con ET_0 .

Nel seguito del capitolo, dopo aver inquadrato il clima d'Italia nell'ambito del clima Mediterraneo, analizzeremo gli strumenti principali per il calcolo del bilancio idrico in atmosfera, lo stato attuale del clima in Italia, il contesto del cambiamento climatico ed infine gli strumenti modellistici per il calcolo del bilancio idrico dalla scala sub-stagionale a quella climatica e dalla scala regionale a quella globale.

4.1.2 Il clima del Mediterraneo

L'Italia si trova al centro del bacino del Mediterraneo e ha un clima, seppur nella diversità dei microclimi locali, "mediterraneo". Questo regime climatico è caratterizzato da due stagioni ben definite, l'estate e l'inverno, cui si frappongono due stagioni di transizione, la primavera e l'autunno. In queste stagioni di transizione, il clima può assumere, di volta in volta, caratteristiche che sono tipiche dell'estate o dell'inverno.

Il clima mediterraneo è determinato da tre fattori principali: l'orografia, la presenza del mare, e i sistemi di pressione che agiscono sull'area. L'orografia scherma il Mediterraneo da molti sistemi atmosferici che vengono deviati principalmente a latitudini più alte. D'altro canto, l'orografia consente di innescare nuovi cicloni, tanto che il Mediterraneo è una delle regioni più ciclogenetiche del mondo. I cicloni

nascono sottovento alle catene montuose e in special modo sottovento alle Alpi Occidentali (golfo di Genova). L'orografia ha un ruolo molto importante anche alla scala locale poiché devia le masse d'aria generando regioni di convergenza/divergenza che possono favorire la nascita di temporali improvvisi e molto intensi (Avolio e Federico, 2018; Federico et al., 2008).

Il mar Mediterraneo ha un ruolo fondamentale nello sviluppo dei cicloni e nella determinazione delle precipitazioni intense. Essendo un mare caldo è in grado di fornire ingenti quantità di vapore ed energia ai sistemi meteorologici che si sviluppano o che transitano nel bacino. L'evaporazione del mare consente di accumulare notevoli quantità di energia nella bassa atmosfera, specialmente in estate ed in autunno, che è utilizzata dai sistemi meteorologici per innescare la convezione profonda evidenziata, ad esempio, dalle notevoli fulminazioni del periodo (il Mediterraneo è la regione europea con il maggior numero di fulmini, Blakeslee et al., 2020). L'aumento della temperatura superficiale del mare, inoltre, sta favorendo lo sviluppo di sistemi *warm-core*, che ricordano gli uragani e che traggono la loro energia, almeno durante specifiche fasi di evoluzione del sistema, direttamente dal mare, con impatti notevoli.

I sistemi di pressione a scala planetaria che agiscono attorno al Mediterraneo sono molto importanti nel determinare il clima del bacino. L'anticiclone delle Azzorre tende ad estendersi verso il Mediterraneo nei mesi estivi proteggendolo dall'intrusione dei sistemi meteorologi-

ci. In inverno, l'anticiclone siberiano si estende verso il Mediterraneo, mentre l'anticiclone delle Azzorre si ritira verso latitudini più basse, favorendo l'ingresso di cicloni o la formazione di nuovi cicloni. Queste caratteristiche delle circolazioni che si sviluppano in Mediterraneo hanno conseguenze importanti sul campo di precipitazione. Questa, infatti, tende ad essere concentrata in autunno e in Inverno determinando un'abbondanza di precipitazione in queste stagioni e un marcato deficit precipitativo in estate. La prima definizione che fu data del clima Mediterraneo (Köppen, 1936), infatti, è quella in cui la precipitazione invernale supera di tre volte la pioggia estiva. È chiaro che un'alterazione dell'equilibrio tra i centri di pressione che agiscono attorno al Mediterraneo ha delle conseguenze notevoli sul clima e sul bilancio idrologico.

Da questo semplice quadro, emerge come il clima Mediterraneo sia piuttosto delicato poiché è il risultato dell'equilibrio di vari fattori, e i cambiamenti della temperatura superficiale del mare e dei sistemi di pressione che agiscono sul bacino stesso possono portare a cambiamenti del clima, con conseguenze notevoli sulla popolazione (circa 500 milioni). Proprio a causa di questo delicato equilibrio, piccole variazioni di una delle componenti sono amplificate dall'interazione con le altre componenti e gli effetti del cambiamento climatico sono più amplificati in Mediterraneo rispetto ad altre regioni del mondo. Anche per questa ragione il Mediterraneo è considerato un hot-spot climatico, ovvero una regione in cui l'impatto e/o la velocità con cui si manifesta il cambiamento globale sono maggiori rispetto alla media planetaria (Giorgi, 2006).

L'Italia, a causa della sua complessità orografica, della notevole estensione in latitudine (tra l'estremo sud d'Italia, l'isola di Lampedusa, e l'estremo nord, la Testa Gemella Occidentale, vi sono circa 12° di latitudine) e della presenza del mare, sviluppa una notevole varietà di microclimi. Le principali regioni climatiche sono spesso classificate secondo il metodo di Köppen che classifica le regioni climatiche della terra in base ai valori medi di temperatura e precipitazione.

La classificazione di Köppen prevede cinque gruppi principali, che sono contraddistinti da lettere maiuscole. I gruppi A, C e D hanno calore e precipitazioni sufficienti da permettere la crescita di alberi d'alto fusto (vegetazione forestale e boschiva).

I gruppi principali della classificazione di Köppen

A. climi tropicali piovosi

temperatura media giornaliera superiore a 18 °C.
Senza stagione fredda.

B. climi aridi

media piovosa sotto il limite di aridità.

C. climi temperato-caldi piovosi

temperatura media del mese più freddo tra 18 °C e -3 °C.
Senza copertura regolare nevosa.

D. climi boreali o delle foreste nivali

temperatura media del mese più freddo sotto -3 °C.

E. climi nivali oppure climi glaciali

temperatura media del mese più caldo inferiore a 10 °C.

L'Italia è caratterizzata da climi principalmente di tipo C, in alcuni casi con tendenza a B, e da climi nivali nelle vette più alte delle Alpi. Vi è poi la possibilità di distinguere delle sotto-regioni omogenee

dal punto di vista climatico, che caratterizzano meglio il clima locale. Per queste regioni si possono aggiungere delle lettere alla classificazione di Köppen. In Italia si hanno dieci diverse regioni climatiche. Si riportano qui di seguito alcune caratterizzazioni principali.

In gran parte della Sardegna, della Sicilia, della Calabria e della Puglia, la fascia costiera occidentale d'Italia (dalla Liguria alla Calabria), il litorale del mar Ionio, le coste adriatiche da Ancona alla Puglia e più in generale tutte le zone di bassa quota del Centro e del Sud il clima è di tipo Csa. Il clima Cs sta ad indicare che le precipitazioni dei mesi invernali (dicembre, gennaio e febbraio) superano di tre volte le precipitazioni dei mesi estivi (giugno, luglio, agosto), mentre la lettera "a" finale indica che la temperatura media del mese più caldo è superiore a 22 °C. Il clima di tipo Csa caratterizza anche le basse zone montuose della Calabria, Sardegna e Sicilia.

Andando più a nord (Lazio, Toscana, Abruzzo, Campania, Molise e Marche) il clima diventa di tipo Mediterraneo ad estate mite (Csb). In questo clima le precipitazioni hanno un andamento simile al clima Csa, ma con la temperatura media del mese più caldo inferiore a 22 °C. In questo clima, la temperatura media rimane superiore a dieci gradi per almeno quattro mesi all'anno.

Un altro tipo di clima ben presente nella nostra penisola è quello di tipo temperato di transizione al Mediterraneo (Cfsa). Questo clima è caratterizzato da abbondante precipitazione in inverno e in autunno e da basse precipitazioni estive, come per il clima Mediterraneo. Questo tipo di clima è caratteristico delle zone più interne della

Liguria e dell'area influenzata dalla presenza del lago di Garda.

Abbiamo poi il clima temperato ad estate calda (Cfa). Questo clima si differenzia da quello tipico Mediterraneo per il suo regime pluviometrico. Si hanno due massimi di precipitazione, uno in autunno e uno in primavera, intervallati da due minimi in estate e in inverno. In genere, a nord del Po, la precipitazione estiva supera quella invernale. A questo tipo di clima appartengono la pianura Padana, la pianura Veneto-Friulana, le coste adriatiche centrali e settentrionali e le zone collinari di Piemonte (fino a 400 m) ed Emilia-Romagna (fino a 500 m).

Vi è poi il clima temperato a estate tiepida (Cfb); caratteristico delle colline e degli altopiani del Piemonte al di sopra di circa 400 metri s.l.m. a nord e 500 metri s.l.m. a sud, dell'Appennino ligure e tosco-emiliano e dei bassi versanti alpini e prealpini (esclusi quelli più interni). Questo clima è caratterizzato dall'abbondanza della precipitazione estiva e dalla temperatura media del mese più caldo inferiore a 22 °C, ma con almeno 4 mesi con temperatura media superiore a 10 °C.

Salendo più in quota si trova poi il clima temperato fresco (Cfc), tipico delle zone prealpine e appenniniche a quote elevate. Anche in questo caso le precipitazioni più alte si riscontrano in estate, ma non mancano nelle altre stagioni.

Oltre ai climi temperato-caldi, come quelli visti finora, l'Italia ha delle aree in cui si hanno climi temperato-freddi, indicati con la lettera D, che sono caratterizzati dall'aver una temperatura media del mese più freddo inferiore a -3 °C. Esiste poi la regione delle vette alpine ed appenniniche più alte, in cui il clima è di tipo polare, indicato con la lettera H. Nel clima polare, la temperatura media del mese più caldo non è mai superiore a 10 °C.

In Italia si hanno i seguenti tre tipi di clima temperato-freddi e polari:

4.1.3

Clima temperato freddo d'altitudine (DfH)

si distingue per l'inverno lungo, rigido e leggermente secco. Questo tipo di clima si trova sull'arco Alpino fino a quote di 2000-2200 metri s.l.m. e nelle valli appenniniche. Sulle Alpi le precipitazioni sono soprattutto estive, mentre sugli Appennini il regime pluviometrico ricalca quello delle rispettive zone climatiche a quote più basse.

Clima freddo della tundra di altitudine (ETH)

questo tipo di clima si ha nell'arco alpino a quote superiori ai 2000-2200 metri s.l.m. e su alcune cime dell'Appennino, caratterizzato da rigide temperature notturne e invernali e da precipitazioni soprattutto estive. Il paesaggio varia gradualmente dalle praterie d'alta quota fino ai ghiacciai.

Clima nivale di altitudine (EFH)

questo tipo di clima caratterizza le vette più elevate delle Alpi ricoperte da neve perenne, con quote generalmente superiori ai 3500 metri s.l.m.

Va evidenziato come i diversi regimi precipitativi del clima italiano abbiano delle conseguenze importanti sul bilancio idroclimatico (ovvero sulla differenza tra precipitazioni ed evapotraspirazione). Nelle regioni caratterizzate da climi tipo Cs la precipitazione è concentrata in inverno e queste regioni sono caratterizzate da un notevole deficit idrico in estate; nelle regioni a clima Cf o Df la precipitazione è meglio distribuita nell'arco dell'anno e le condizioni di deficit idrico non sono così marcate in estate come nei climi Cs.

Dal quadro precedente emerge la complessità del clima d'Italia all'interno del clima Mediterraneo. In questa varietà, è importante monitorare le diverse variabili meteorologiche utili per la stima del bilancio idrologico e idrico e per fornire allerte tempestive per possibili condizioni di siccità.

Monitoraggio

4.2

In questa sezione sono riportati i principali strumenti per l'osservazione dei parametri meteorologici utili alla definizione del bilancio idroclimatico. Tra questi parametri troviamo la precipitazione e la temperatura dell'aria, cui possono aggiungersi anche altri parametri come umidità relativa, radiazione solare e vento in superficie.

4.2.1

Le stazioni di superficie

Le reti osservative di superficie sono strumenti importanti per la stima del bilancio idrico e per la stima degli indici utilizzati per il monitoraggio della siccità (si veda a questo proposito il paragrafo 11.5) poiché consentono di osservare in-situ e con ottima precisione i parametri meteorologici di interesse. Una stazione meteorologica completa consente di misurare i seguenti parametri: temperatura dell'aria, precipitazione, umidità relativa, radiazione solare globale, modulo e direzione del vento. A queste misurazioni possono, eventualmente, aggiungersi osservazioni di tipo più specialistico come, ad esempio, l'umidità del suolo, la visibilità, l'altezza delle nubi, le varie componenti della radiazione solare, la concentrazione di specie in atmosfera etc. I parametri meteorologici sono osservati tra 1.5 e 2 m dalla superficie sottostante, ad eccezione del vento che va osservato a 10 m (questo requisito non si applica per le stazioni agrometeorologiche in cui il vento va misurato a 2 m di altezza). Questi standard sono dettati dall'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM, o WMO in inglese) che rilascia periodicamente delle guide per le pratiche da utilizzare nei rilevamenti meteorologici (World Meteorological Organization, 2023). Le stazioni vanno col-

locate in campo aperto (la distanza degli ostacoli deve essere di almeno dieci volte l'altezza degli ostacoli stessi) e su un terreno con prato naturale.

Le reti di rilevamento di superficie in Italia sono varie e, per certi versi, eterogenee, anche in conseguenza del fatto che sono state realizzate per scopi diversi. Negli anni recenti, inoltre, la riduzione dei costi di questo tipo di strumentazione ha consentito la nascita di diverse reti locali e amatoriali che hanno raggiunto notevoli livelli di affidabilità, di copertura del territorio e di densità. In questo capitolo, tuttavia, ci riferiremo a tre reti principali: la Rete delle regioni italiane (è la rete dell'ex Ufficio idrografico e mareografico nazionale - SIMN), la Rete dell'Aeronautica militare e la Rete agrometeorologica nazionale (RAN) del CREA (Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria).

La Rete delle regioni è centralizzata presso il Dipartimento della protezione civile ed è la più ampia in termini numerici. Consiste di circa 4000 punti di osservazione, distribuiti piuttosto omogeneamente sul territorio nazionale (circa una stazione ogni 75 km²), come mostrato in Figura 4.1.

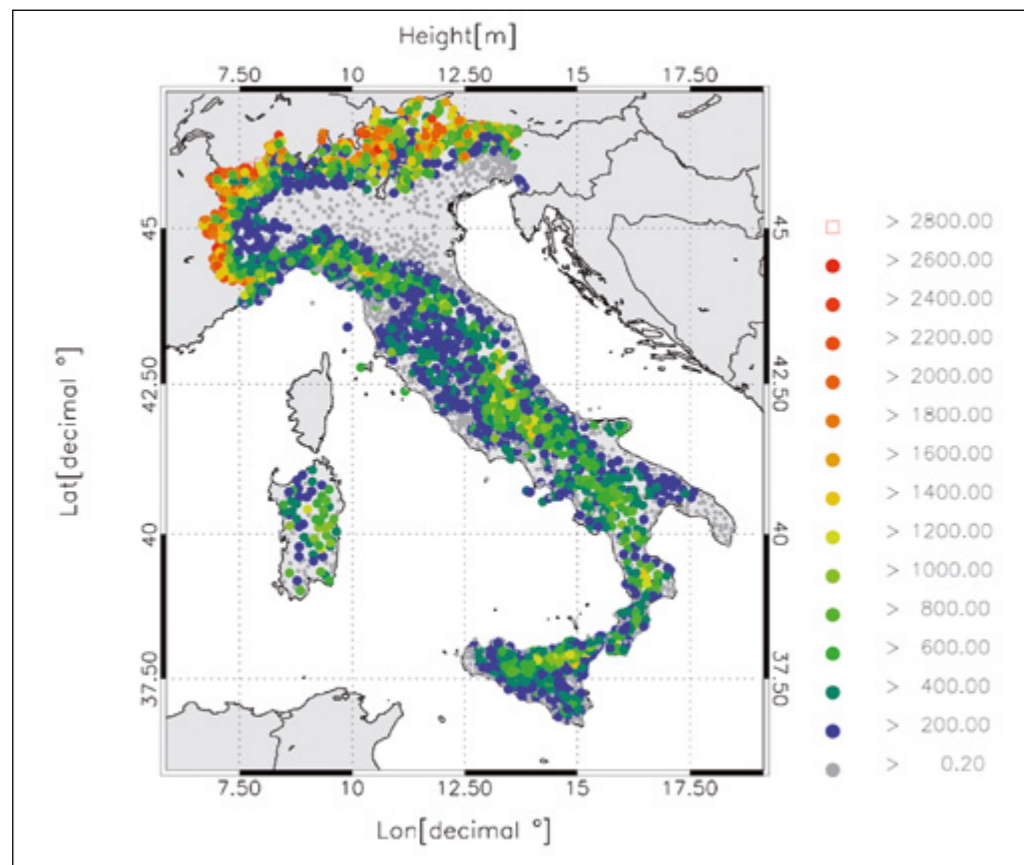


Figura 4.1
Distribuzione della rete di osservazione delle regioni. Il codice colore in legenda si riferisce alla quota delle stazioni in metri s.l.m.

La rete delle regioni è sostanzialmente una rete termo-pluviometrica e l'osservazione degli altri parametri meteorologici è infrequente. La profondità delle serie temporali a disposizione è molto variabile: si possono avere serie di circa un secolo e serie che iniziano nei primi anni '90 del secolo scorso, quando vi fu una razionalizzazione della rete. Il numero notevole di stazioni che compongono la rete consente di fare delle ottime stime delle precipitazioni e delle temperature sul territorio nazionale e consente di compilare alcuni indici di siccità basati su criteri termo-pluviometrici.

Un'altra Rete molto importante sul territorio nazionale è quella dell'Aeronautica militare. Questa rete conta circa 170 stazioni (21 stazioni aeroportuali, 52 stazioni presso teleposti meteo, 94 stazioni automatiche) dislocate piuttosto omogeneamente sul territorio (circa 1 stazione ogni 2600 km²). Per molte delle stazioni

di questa rete le serie storiche cominciano a metà del secolo scorso, anche se per alcune si può arrivare fino all'inizio del secolo scorso. Tutte le stazioni compiono osservazioni secondo criteri e orari stabiliti in sede internazionale, e sono identificate da un indicativo numerico dell'OMM. La rete delle stazioni dell'Aeronautica militare, così come le altre reti presentate in questo paragrafo, è soggetta a manutenzione per assicurare il corretto funzionamento della strumentazione e l'adeguata rispondenza agli standard di osservazione stabiliti dall'OMM. Le osservazioni possono avere scopi sia aeronautici, sia sinottici: le stazioni sinottiche sono rappresentative di un'area di circa 70 km di raggio e si susseguono a intervalli orari, triorari ed esaorari. Le osservazioni aeronautiche (METAR) per l'assistenza alla navigazione aerea sono, di norma, a cadenza oraria e semioraria e possono essere tempestivamente aggiornate (SPECI) per segnalare improvvise variazioni dello stato del tempo.

Nella rete di stazioni dell'Aeronautica militare vi è un gruppo di stazioni, denominate Data Collection Platform (DCP), che acquisiscono con continuità tutti i parametri meteorologici rilevati dai sensori di cui sono dotate e compilano automaticamente il bollettino di osservazione. Questo bollettino è trasmesso al satellite METEOSAT, che, a sua volta, invia i dati a un centro di raccolta che lo immette sulla rete di telecomunicazioni meteorologiche Global Telecommunication System (GTS), che ne assicura la disponibilità a tutti i Servizi Meteorologici Nazionali.

Accenniamo infine, alla Rete agrometeorologica nazionale (RAN; per una mappa sulla dislocazione delle stazioni agrometeorologiche si può far riferimento alla pagina del Ministero delle politiche agricole:

https://www.politicheagricole.it/flex/FixedPages/Common/miepfy200_rete-Agrometeorologica.php/L/IT). La Rete agrometeorologica nazionale è costituita dalle centraline automatiche localizzate in zone a principale vocazione agricola e consta di circa 50 stazioni agrometeorologiche (densità di circa 1 stazione ogni 6000 km²), più una trentina di osservatori storici con rilevamento dati di oltre un secolo. I dati rilevati sono acquisiti con cadenza oraria e sottoposti a sistematici controlli di correttezza e consistenza fisica e meteorologica prima di essere archiviati nella Banca dati agrometeorologica nazionale del SIAN e utilizzati per il monitoraggio agrometeorologico. La RAN è stata progettata, ed acquisisce dati, a partire dal 1991 considerando due requisiti principali: 1) la rete doveva coprire le aree italiane di notevole interesse agricolo (ad esempio colture di particolare importan-

za); 2) la rete doveva integrarsi con quelle già preesistenti dell'Aeronautica militare e dell'ENAV e con la rete dell'UCEA (Ufficio centrale di ecologia agraria, cui appartengono gli osservatori storici citati sopra). È importante sottolineare come queste stazioni agrometeorologiche misurino delle quantità diverse da quelle delle stazioni meteo convenzionali. In particolare, oltre al fatto che il vento è misurato a 2 m di quota, ovvero più vicino alle colture rispetto al vento a 10 m utilizzato nelle normali centraline meteorologiche, si misurano le temperature a 5 cm e 20 cm dalla superficie, l'umidità a 20 cm dalla superficie, il flusso di calore nel suolo, la bagnatura fogliare e l'evaporazione potenziale, tutte grandezze rilevanti per l'agrometeorologia. Anche questi standard sono regolati dall'OMM.

Le stazioni agrometeorologiche sono utilizzate anche per la stima dell'evapotraspirazione reale. Tra i metodi più usati per la stima di questa grandezza ci sono quello di Hargreaves (Hargreaves, 1982) ed il metodo di Penman-Monteith modificato dalla FAO (Allen, 1998). Nel metodo di Hargreaves occorre misurare la temperatura dell'aria (a un'altezza di 1.5-2.0 m dalla superficie) e occorre stimare la radiazione astronomica al sito di interesse. Il metodo di Penman-Monteith tiene conto anche dell'evapotraspirazione indotta dal trasporto del vento. In questo caso, oltre alla temperatura, occorre misurare l'umidità relativa, l'intensità del vento (a 2 m di altezza) e il valore della radiazione netta, dato dalla differenza tra la radiazione solare in corrispondenza delle lunghezze d'onda corte e la radiazione emessa dalla superficie terrestre.

Il radar meteorologico è uno strumento molto importante per il monitoraggio in tempo reale della precipitazione e per la previsione a brevissimo termine (1-2h) dei sistemi meteorologici più intensi. Questo strumento consente di valutare il tipo di precipitazione, la sua intensità e il movimento del sistema precipitante.

I radar meteorologici inviano impulsi direzionali di radiazione alle microonde che interagiscono con le goccioline e con le particelle di ghiaccio presenti nei corpi nuvolosi e, in base al segnale retro-diffuso, risalgono ad alcune caratteristiche dei corpi nuvolosi e delle precipitazioni.

Le lunghezze d'onda che si utilizzano dipendono dal tipo di radar e dall'applicazione che se ne vuol fare. Generalmente, e in particolare nel caso dei radar della rete radar nazionale, le lunghezze d'onda che si utilizzano vanno da 5 a 10 cm (rispettivamente banda C e X). Queste lunghezze d'onda sono generalmente molto più grandi della dimensione tipica delle particelle di pioggia e di ghiaccio, fatta eccezione per la grandine.

I radar meteorologici possono avere altre due caratteristiche importanti che ne indicano il tipo:

radar doppler

sono in grado di misurare la componente radiale della velocità del vento.

radar polarimetrici

sfruttano l'informazione sulla polarizzazione del segnale riflesso per stimare in maniera particolarmente accurata l'intensità della precipitazione.

Nel caso italiano esiste una rete radar avanzata che copre quasi del tutto il territorio nazionale. Si tratta di una rete federata, composta da 26 sistemi gestiti da 13 Amministrazioni/Enti, tra cui Dipartimento della protezione civile nazionale (DPC), le Regioni, l'ENAV e l'Aeronautica militare. Il DPC, che gestisce direttamente 11 sistemi radar, riceve i dati dai partner al fine di generare prodotti meteorologici su scala nazionale. Una mappa della distribuzione della rete radar nazionale è riportata in Figura 4.2.

Un vantaggio molto importante offerto dalla rete radar rispetto ai pluviometri è quello della copertura spaziale continua del territorio italiano (con piccole eccezioni come la Sicilia occidentale). Questo consente di stimare con buona precisione il campo di precipitazione tra due diversi pluviometri o in aree remote. Va anche evidenziato che in estate si possono verificare dei temporali molto localizzati che non sono ben osservati dai pluviometri poiché sono troppo distanti tra loro per osservare il temporale (o osservarne la parte più intensa). Questa considerazione si applica, in qualche misura, anche agli eventi meteorologici più estesi, in cui la rete pluviometrica non può osservare le strutture temporalesche più piccole all'interno del sistema meteorologico principale, ma che sono importanti in termini di bilancio idrologico. La rete radar nazionale fornisce il prodotto SRT_1 che rappresenta la cumulata di precipitazione (mm) nell'ultima ora sulla base dell'integrazione dell'osservazione radar di intensità di precipitazione su 1 ora e i dati della rete a terra (Fig. 4.3).



Figura 4.2
Posizioni dei radar della rete radar meteorologica nazionale. I radar in verde hanno la doppia polarizzazione quelli in blu la singola polarizzazione.

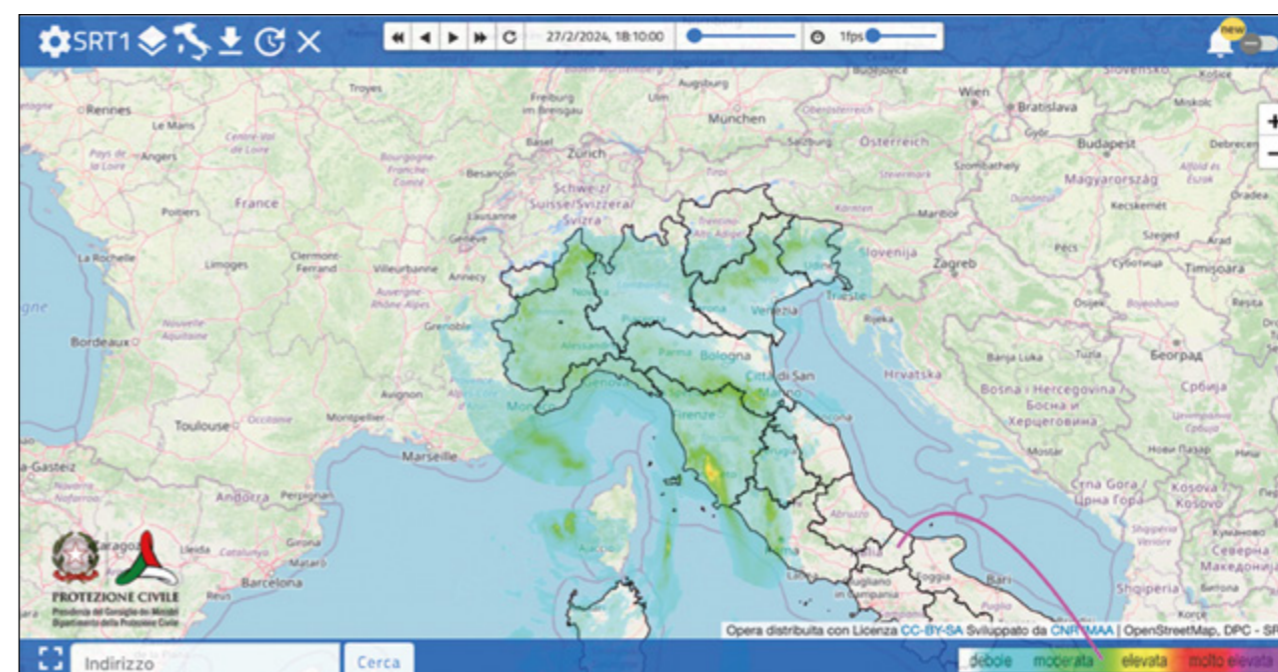


Figura 4.3
Mappa SRT_1 delle 18:10 UTC del 27 febbraio 2024. Dal sito del Dipartimento della protezione civile: <https://mappe.protezionecivile.gov.it/it/mappe-rischi/piattaforma-radar/>

Ci sono alcuni limiti alle osservazioni da terra. I pluviometri forniscono la stima più diretta della precipitazione alla superficie, tuttavia non sono esenti da errore. La principale sorgente di errore dei pluviometri è la sottostima della pioggia in condizioni di vento forte. Questo aspetto è molto importante anche per la neve, la cui sottostima in condizioni di vento forte può arrivare al 50% (Vinayak et al., 2009). In ogni caso i pluviometri forniscono le stime di pioggia in corrispondenza del sensore e, per avere una stima in zone non coperte dai sensori, occorre interpolare i dati. Inoltre, i pluviometri su mare sono rari, sono posti su atolli, isole o piattaforme e non consentono di avere delle stime adeguate di pioggia su mare. I radar meteorologici consentono di risolvere in parte il problema della copertura spaziale dei pluviometri e forniscono delle stime areali piuttosto che puntuali della precipitazione. Tuttavia, la loro estensione su mare è limitata (dell'ordine di 100 km) e le osservazioni rimangono principalmente confinate su terra.

L'osservazione radar, inoltre, è una misura indiretta della pioggia ed è soggetta a errori. In particolare, la riflettività, che è la grandezza osservata dal radar, non dipende direttamente dall'intensità di precipitazione bensì dal numero di idrometeore presenti nella massa d'aria osservata, dalla distribuzione dei loro diametri e dallo stato fisico dell'acqua che le compone; a diversi valori di intensità di pioggia possono dunque corrispondere medesimi valori di riflettività. Inoltre, il radar misura la pioggia in quota, che non coincide con quella che si ha alla superficie. Esistono dei prodotti combinati radar-pluviometri che rappresentano la migliore stima della precipitazione su terra.

Una fonte molto importante di dati di precipitazione, che non soffre dei problemi di copertura spaziale evidenziati in precedenza è quella della stima da satellite, soprattutto se si considera la scala globale. Le osservazioni da satellite danno una stima sinottica e globale della precipitazione, con delle risoluzioni spazio-temporali che sono utili a molte applicazioni, anche se possono avere problemi di accuratezza dell'osservazione a causa del fatto che l'osservazione è indiretta.

Il primo satellite TIROS (Television InfraRed Observing Satellite) ha iniziato l'era dell'osservazione della Terra da satellite nell'aprile del 1960. A valle di questo lancio, l'Organizzazione meteorologica mondiale ha stabilito il programma World Weather Watch nel 1963 per coordinare le osservazioni della Terra dalla superficie e dallo spazio. Successivamente, nel 2005, l'OMM è stata incaricata dalle varie nazioni di fornire dati meteorologici stabili e di lungo termine. In questo contesto i satelliti meteorologici hanno giocato un ruolo fondamentale.

I satelliti meteorologici possono essere divisi in due grandi categorie: i satelliti geostazionari e i satelliti in orbita bassa, che includono i satelliti in orbita polare.

I satelliti geostazionari sono posizionati a circa 36 000 km dalla superficie della Terra e sono caratterizzati da un piano orbitale coincidente con quello dell'equatore. Ruotano alla stessa velocità della Terra e, per questo, osservano di continuo la stessa area della superficie terrestre. Ogni satellite è in grado di vedere circa 1/3 della superficie terrestre, ma la risoluzione spaziale dell'osservazione decresce andando verso i bordi dell'area osservata. Per questa ragione occorrono cinque satelliti geostazionari

per poter osservare l'intera superficie terrestre (da 70S a 70N in latitudine). Anche se vi sono differenze tra i diversi satelliti geostazionari, essi hanno un certo numero di caratteristiche simili. In particolare, forniscono misure nell'infrarosso e nel visibile con risoluzioni che vanno da qualche chilometro nel caso del sensore infrarosso al chilometro nel caso del visibile. La frequenza con cui vengono acquisite le immagini è inferiore a 30 minuti, anche se nel caso del METEOSAT di seconda generazione questa frequenza è dell'ordine di 15 minuti. Altra caratteristica importante dei satelliti geostazionari è la possibilità di acquisire le immagini a varie frequenze, consentendo di poter analizzare anche le caratteristiche microfisiche delle nubi.

La seconda classe di satelliti è quella dei low Earth orbiting (LEO) che complementano i satelliti geostazionari. Questi satelliti, a loro volta, si dividono in due classi: quelli sincroni con il sole e quelli non sincroni. Alla prima classe appartengono i satelliti LEO operativi e, poiché sono sincroni con il sole, attraversano l'equatore sempre alla stessa ora del giorno, garantendo fino a due passaggi giornalieri. Anche i satelliti LEO trasportano radiometri nel visibile e nell'infrarosso, tuttavia aggiungono l'importante caratteristica di trasportare sensori nelle microonde, capaci di una misura più diretta della precipitazione. Ad oggi i satelliti di questo tipo includono i satelliti del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Kidwell, 2014) e quelli della serie MetOp di EUMETSAT (Klaes et al., 2007).

Tra gli strumenti trasportati dai satelliti polari vi sono il AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer, Kidwell, 2014) e il Microwave Humidity Sounder (MHS). Il sensore AVHRR ha fornito una lunga serie di dati nel visibile e nell'infrarosso termico a una risoluzione di 1 km. Grazie a un campo di vista di circa 3000

km di ampiezza, AVHRR ha consentito di rivisitare una zona della terra due volte al giorno. Più recentemente il Moderate-Resolution Imaging Sensor (MODIS), a bordo dei satelliti Aqua e Terra ha fornito immagini nel visibile e infrarosso in 36 bande spettrali ad una risoluzione spaziale che può scendere fino a 250 m.

Un notevole passo in avanti nella stima delle precipitazioni da satellite e nello studio delle nuvole si è avuto con l'avvento dei sensori passivi a microonde (Passive Microwave Sensors, PMW). Il primo sensore alle microonde è stato lo Electrically Scanning Microwave Radiometer (ESMR) che ha volato sui satelliti Nimbus-5 e Nimbus-6. Questo sensore ha aperto la strada, nel 1978, allo Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR), a bordo del Nimbus-7, che ha fornito osservazioni da 6 a 37 GHz. Nel 1987 è stato lanciato lo Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) sulla serie di satelliti Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) con frequenze da 18 a 85 GHz, essendo quest'ultima particolarmente utile per la stima della precipitazione. I sensori SSMI sono stati la principale fonte per la stima della pioggia dal 1987 fino al 2005, anno in cui è stato messo in orbita il nuovo sensore SSMIS (Special Sensor Microwave Imager-Sounder; Kummerow et al., 2008). Le osservazioni operative alle microonde sono molto utili per la stima della precipitazione da satellite e hanno ampiamente utilizzato le osservazioni dei sensori AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) e MHS che forniscono informazioni da 23.8 a 190 GHz.

Una missione molto importante per lo studio della precipitazione misurata dai satelliti è la missione TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission, Kummerow et al., 1998), dedicata ai tropici, che è stata la prima missione a poter misurare la precipitazione sia in orizzontale che in verticale.

La missione TRMM, infatti, è stata la prima ad avere a bordo un radar attivo (Iguchi et al., 2000), operante alla frequenza di 13.6 GHz, ideale per l'osservazione della precipitazione ai tropici. Il campo di vista del radar è di 215 km e consente di poter fare delle osservazioni in verticale alla risoluzione di 250 m ed in orizzontale con una risoluzione di 5 km. Oltre al radar, la missione TRMM aveva a bordo un radiometro alle microonde tipo SSM/I a cui è stata sommata l'osservazione alla frequenza di 10 GHz, molto utile per l'osservazione della pioggia sugli oceani. La missione TRMM aveva a bordo anche il sensore LIS (Lightning Imager Sensor) per l'osservazione dei fulmini dallo spazio ed il VISR (Visible and Infrared) scanner. L'insieme dei sensori a bordo della missio-

ne TRMM consentiva l'osservazione sia attiva che passiva delle precipitazioni.

La missione TRMM è stata alla base per una nuova e più avanzata missione per la stima della precipitazione da satellite: la Global Precipitation Measurement (GPM), iniziata il 27 Febbraio del 2014 (Skofronick-Jackson et al., 2017). Questa è una missione internazionale NASA-JAXA che si basa su un nuovo satellite con a bordo due strumenti per la misura della pioggia: un radar e un radiometro. Le osservazioni di questi strumenti di riferimento sono utilizzate sia per dare l'osservazione della precipitazione sia per calibrare altri satelliti (di ricerca e operativi), le cui osservazioni sono utilizzate dalla GPM per la stima della pioggia a livello globale.

Le stime di pioggia da satellite

I metodi basati sul visibile e sull'infrarosso rimangono, ad oggi, i principali per la stima operativa della pioggia da satellite. Nelle immagini visibili, le nuvole appaiono più brillanti rispetto alla superficie sottostante grazie alla loro albedo più alta. Ci sono studi che mostrano la possibilità di stimare la pioggia dal canale visibile (Follansbee, 1975) tuttavia, la relazione tra radianza osservata e intensità di precipitazione non ha delle ottime prestazioni e le immagini sono disponibili solo di giorno. Ad ogni modo, le immagini nel visibile sono molto importanti per identificare l'area delineata dalle nuvole e per identificare i tipi di nuvole. Ad esempio, i cumulonembi, che sono più spessi, riflettono più luce rispetto ai cirri sottili e appaiono più brillanti nelle immagini del visibile.

Le immagini nell'infrarosso termico misurano la radiazione che è emessa naturalmente dalle nuvole e sono dispo-

nibili sia di notte che di giorno. In base alla temperatura rilevata nell'infrarosso può essere dedotta l'altezza delle nuvole e, poiché l'estensione verticale di una nuvola è correlata con la precipitazione che produce, è possibile ottenere una stima del rain-rate dalle osservazioni nell'infrarosso. La relazione tra il rain-rate e la temperatura nell'infrarosso è piuttosto complessa e dipende da una serie di fattori quali il regime climatico, il tipo di precipitazione e la vita del sistema precipitante. Per questa ragione la relazione tra rain-rate e temperatura nell'infrarosso è di tipo statistico ed è basata su calibrazione. L'osservazione nel vicino infrarosso, ad esempio alle frequenze di 1.6, 2.1, e 3.0 mm, consente invece di avere delle informazioni sulle particelle che si trovano alla sommità delle nuvole come la grandezza delle idrometeore e la fase. Queste tecniche possono essere estese anche alla notte attraverso l'uso di altri canali nell'infrarosso (10.8 e 3.7 mm).

Fin dai primi studi di Weinman e Guetter (1977) e Wilheit et al., (1977) emerse che la radiazione passiva alle microonde è più direttamente collegata alle particelle precipitanti rispetto al visibile e all'infrarosso. Nella parte dello spettro alle microonde, la Terra emette una radiazione poco intensa che interagisce con le idrometeore e cambia la radiazione ricevuta dal sensore sul satellite. Nello specifico, l'emissione di radiazione a microonde delle particelle di pioggia fa crescere la radiazione che raggiunge il satellite, mentre lo scattering delle particelle di ghiaccio diminuisce la radiazione alle microonde che raggiunge il satellite. La possibilità di stimare la precipitazione dalle microonde dipende dalla superficie: sul mare l'emissività nelle microonde è bassa (0.3-0.4) e i segnali emessi dalle particelle liquide possono essere utilizzati per la stima della pioggia. Sulla terra l'emissività è più alta (0.8-0.9) e le stime di precipitazione vanno fatte a partire dallo scattering delle particelle di ghiaccio. Vi è quindi una chiara distinzione tra le tecniche basate sull'emissione su tutta la colonna e le tecniche basate sullo scattering che considerano la parte di ghiaccio della nuvola.

Poiché una singola risposta dei canali a microonde non è univoca con la precipitazione, si sono sviluppate tecniche multicanale per la stima della pioggia. Queste tecniche possono essere divise in due gruppi: quelle empiriche e quelle fisicamente basate. Le tecniche empiriche sono semplici da implementare e tengono conto di una serie di artefatti che possono caratterizzare l'osservazione (ad esempio, riempimento parziale del fascio, differen-

ze nella risoluzione, disomogeneità della superficie sottostante). Queste tecniche, tuttavia, richiedono una calibrazione a livello regionale. I metodi fisicamente basati si basano su modelli di trasferimento radiativo.

La stima della precipitazione con le microonde ha due problemi principali, che possono limitarne l'utilità pratica. Il primo è il tempo di rivisitazione che è, per i satelliti operativi, di 12 ore; il secondo è la bassa risoluzione spaziale delle osservazioni alle microonde. Si va da qualche decina di chilometri per le frequenze più basse a qualche chilometro per le frequenze più alte.

Le diverse tecniche di utilizzo dei canali alle microonde e nell'infrarosso per la stima della precipitazione da satellite hanno consentito di mettere a punto una serie di dataset globali. Tra questi ce ne sono due che menzioniamo in questo capitolo. Il primo è il dataset GPM-IMERG (<https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/47c32530265d-4d6e8fdb6c08b2330371>) arrivato alla sua versione 6, che fornisce le precipitazioni a scala globale su terra e su mare ogni 30 minuti e il dataset HSAF (<https://hsaf.meteoam.it>), distribuito attraverso il sito dell'Aeronautica militare, che fornisce vari prodotti di precipitazione (anche nevosa) basati sulle immagini METEOSAT. Tra questi prodotti c'è la precipitazione combinata (dataset H60) tra i canali infrarosso e le microonde disponibile su tutta l'immagine del METEOSAT ogni 15 minuti. Questi dataset sono anche utilizzati per il monitoraggio della siccità (si veda ad esempio Wei et al., 2020).

Le analisi meteorologiche rappresentano la migliore stima che si può fare da un punto di vista statistico dei campi atmosferici partendo da due informazioni: le osservazioni (sia in situ che remote, sia da terra che da satellite) e un campo su un reticolo spaziale regolare fornito da un'altra sorgente di dati, generalmente un modello meteorologico. Questo campo spazializzato su griglia regolare è chiamato campo di background (o *first guess*). Sia il campo di background che le osservazioni sono noti con un loro errore ed il processo di analisi ottiene la migliore stima del campo finale, l'analisi appunto, tenendo conto degli errori delle due sorgenti di dati.

Le analisi meteorologiche più utilizzate e più diffuse sono quelle in cui si combinano le uscite di un modello meteorologico con le osservazioni per ottenere la migliore stima del campo su griglia regolare. Queste analisi modellistiche possono essere utilizzate sia per scopi conoscitivi, che per l'inizializzazione del modello meteorologico che ha fornito il campo di background o di altri modelli/processi a cascata.

Nel processo di analisi meteorologica, il modello è utilizzato come un interpolatore fisico per la ricostruzione dei processi alle varie scale rappresentate dal modello. Tra le rianalisi modellistiche principali ci sono quelle fornite dal centro Europeo, ad esempio ERA5 (Hersbach et al., 2020), che sono il riferimento per la scala globale e sono distribuite tramite i servizi C3S di Copernicus, ma anche analisi a livello più locale come quelle MERIDA (Bonanno et al., 2019). Tra i primi lavori di analisi ricordiamo anche le mappe di temperatura realizzate per la Calabria da Federico (2011) in cui si mostra anche il confronto con le interpolazioni statistiche e la riduzione dell'errore che si ottiene dal processo di analisi.

La risoluzione spaziale delle analisi meteorologiche è un aspetto molto impor-

tante. In generale, i modelli meteorologici hanno varie sorgenti d'errore che possono determinare degli errori sistematici più o meno grandi a seconda dell'area considerata. Tuttavia, quando la risoluzione delle analisi è di qualche decina di chilometri, come nel caso delle analisi globali, si possono avere degli importanti errori di rappresentatività del dato. Per questa ragione le rianalisi vanno sempre verificate e calibrate (ad esempio, Steinkopf e Engelbrecht, 2022; Wu et al., 2022), o aumentate di risoluzione con *downscaling* dinamico (Raffa et al., 2021) per lo scopo e per l'area in cui sono utilizzate. Esistono vari metodi per ridurre l'errore sistematico delle analisi (ad esempio l'utilizzo del quantile mapping, la rimozione del Bias, la Model Output Statistics, etc.). Questi problemi sono notevolmente ridotti quando si usa la differenza tra i valori delle analisi poiché il bias del modello è rimosso dall'operazione di differenza. Un esempio di questo tipo di applicazione è mostrato nel focus di questo capitolo sulla crisi idrica nel bacino del fiume Po del 2022-2023.

Uno dei vantaggi offerti dalle analisi meteorologiche che utilizzano le uscite di modelli meteo come campo di background è che gli output riguardano tutti i campi di interesse per definire il bilancio idrico (temperatura, umidità relativa, vento, precipitazione, evapotraspirazione, evaporazione) e che si utilizza un interpolatore di natura fisica (il modello meteorologico). Il ruolo delle osservazioni per ottenere delle analisi meteorologiche affidabili è fondamentale, e il peso delle osservazioni è tanto maggiore quanto più sono i punti di misura che entrano nel processo assimilativo e che consentono di raffinare il processo dell'analisi meteorologica e di portarlo, eventualmente, alla scala locale.

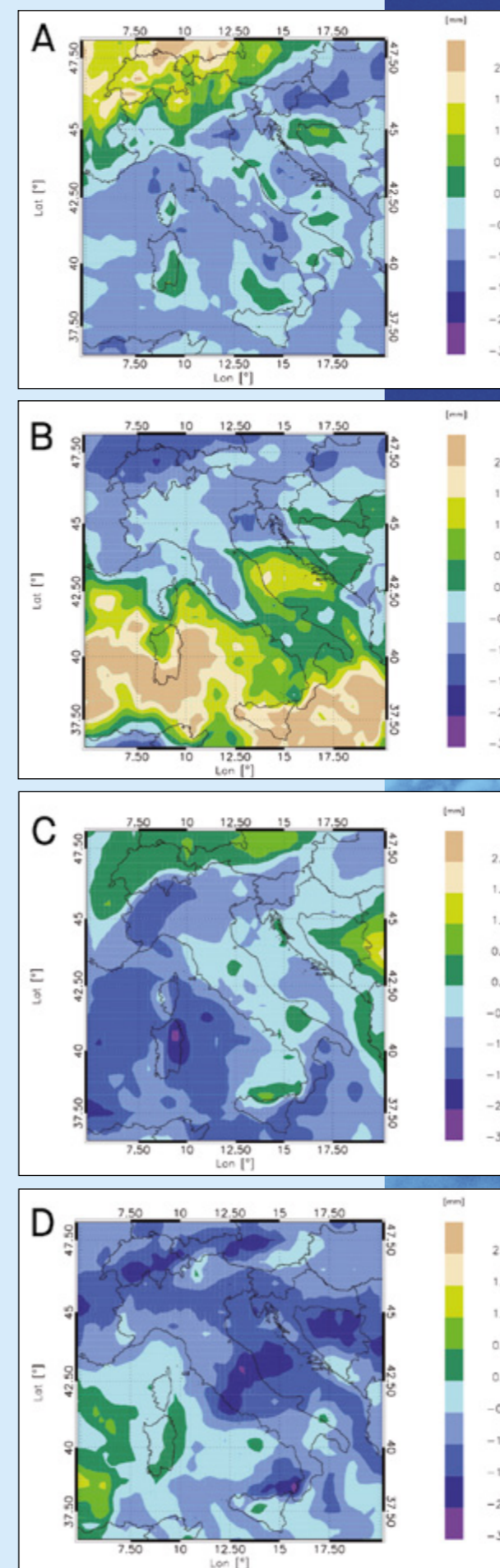
La siccità del 2022 nel bacino del fiume Po. Aspetti meteo-climatici

Nel presente approfondimento è analizzato, da un punto di vista climatico, l'evento siccitoso che ha interessato il bacino del Po e in generale tutto il Nord Italia, iniziato nell'anno 2021 e che si è protratto anche nei primi mesi del 2022. La crisi idrica che ne è scaturita è stata determinata in primo luogo dalla diminuzione significativa delle precipitazioni sull'Italia in genere e sul Nord Italia nello specifico. Per quantificare meglio questo evento viene presentata un'analisi delle precipitazioni delle rianalisi ERA5 per le tre stagioni antecedenti la primavera del 2022 e per la primavera 2022 stessa.

Sono state considerate le anomalie standardizzate riferite al trentennio 1991-2020, che esprimono la differenza di una variabile rispetto al suo valore medio su un periodo (1991-2020 in questo caso) divisa per la deviazione standard della variabile sullo stesso periodo. Le anomalie standardizzate per l'estate 2021, per l'autunno 2021, per l'inverno 2021-2022 e per la primavera 2022 sono riportate in Figura 4.4.

Nell'estate 2021 si nota una riduzione della precipitazione rispetto alla climatologia di riferimento per la maggior parte del territorio italiano, ad eccezione di Lombardia, Trentino e Veneto. Nella stagione successiva si nota una sostanziale decrescita della precipitazione su tutto il Nord Italia, mentre il regime pluviometrico è rimasto simile a quello climatologico o, in casi come la Sicilia e la Calabria, si sono avute delle precipitazioni superiori alla media. Nella stagione invernale 2021-2022 si nota, invece, una notevole decrescita delle precipitazioni su gran parte del territorio nazionale con qualche eccezione, come la Sicilia settentrionale. La diminuzione della precipitazione è evidente soprattutto nel Nord Italia, specialmente nel nord-ovest. La primavera 2022, infine, è stata particolarmente siccitosa su tutta Italia con rare eccezioni in Sicilia e Sardegna (panello in basso a destra). L'impatto sulla pianura Padana è evidente così come sul Centro Italia. Di conseguenza, la notevole siccità che è stata riscontrata sul bacino del Po nel 2022 è stata indotta da una riduzione notevole delle precipitazioni nelle stagioni precedenti la primavera 2022, in cui i problemi sono stati evidenti.

Figura 4.4
Anomalie standardizzate della precipitazione ERA5 per le stagioni estate 2021 (A), autunno 2021 (B), inverno 2021-2022 (C), primavera 2022 (D).



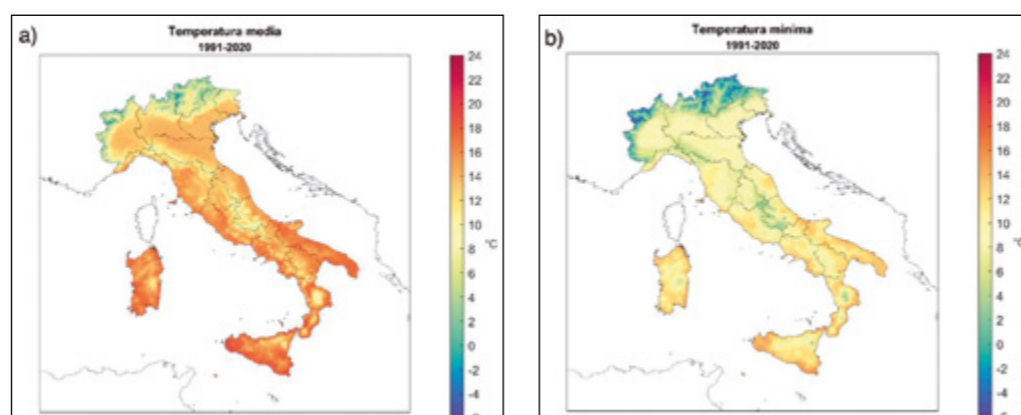
Regime pregresso e stato attuale

In questa sezione sono riportate alcune considerazioni sugli andamenti delle temperature e delle precipitazioni in Italia, quali principali parametri meteorologici per il bilancio idroclimatico. Esiste una vasta letteratura relativa alle analisi di temperatura e precipitazioni che differiscono a seconda delle aree considerate, del periodo e del numero di stazioni prese in esame. Alcuni di questi studi mostrano delle peculiarità climatiche di aree specifiche e sono svolti a maggiore risoluzione. Tuttavia, almeno per le temperature, preferiamo riportare i normali climatici elaborati da ISPRA (Fioravanti et al., 2022) in quanto i dati hanno una buona risoluzione spaziale e consentono di caratterizzare il clima d'Italia. I dati, inoltre, sono disponibili on-line e scaricabili (<https://valori-climatici-normali.isprambiente.it>), e si riferiscono a un periodo climatico ampio.

I normali climatici sono definiti come i valori medi di una variabile climatica su un periodo di riferimento di 30 anni (OMM) e rappresentano i valori rispetto ai quali confrontare le osservazioni e monitorare l'andamento del clima. In particolare, sono utilizzati per definire una base climatica standard con la quale si possono con-

frontare diverse regioni del mondo e con la quale possono essere svolte delle pianificazioni anche a lungo termine in base all'andamento delle variabili climatiche a scala locale. L'OMM ha definito i normali climatici nella prima metà del ventesimo secolo con l'obiettivo di consentire il confronto tra le osservazioni di tutto il mondo, assicurando la coerenza fra le informazioni dei diversi servizi meteorologici. Inoltre, ha fissato a 30 anni la durata del periodo di riferimento, da aggiornare ogni 10 anni. Nello specifico le mappe mostrate successivamente per la temperatura media sono state realizzate con 312 serie complete di stazioni termometriche (Fioravanti et al., 2022).

Per la precipitazione, invece, preferiamo riportare i risultati dello studio di Crespi et al. (2018), riferiti al periodo 1961-1990, che ha una risoluzione maggiore (6134 pluviometri) e consente di rappresentare meglio le caratteristiche locali del campo di precipitazione in Italia. Inoltre, per l'analisi del trend di precipitazione, si utilizzerà il lavoro Caporali et al. (2021) in cui si considerano i risultati derivanti da circa 60 studi condotti in Italia.



Andamento delle temperature

La Figura 4.5 (pannello a) mostra l'andamento dei normali climatici delle temperature medie, massime e minime per l'Italia nel trentennio di riferimento (1991-2020). I normali climatici sono stati calcolati a partire dai dati giornalieri, come media, somma o numero di giorni sopra o sotto una determinata soglia, in base all'indicatore considerato. Per ogni mese, il valore normale è il valore medio nel trentennio climatologico di riferimento, per le stazioni con almeno 24 anni validi. In base ai normali mensili vengono poi calcolati i normali stagionali e annuali.

I valori normali della temperatura media si distribuiscono tra il minimo di 2.4 °C registrato sul Monte Faloria (in provincia di Belluno a una quota di 2210 m s.l.m.) e il massimo di 19.5 °C riscontrato a Mazara del Vallo (in provincia di Trapani). La mappa mette in evidenza che i valori più bassi si registrano sull'arco alpino occidentale e centrale, mentre quelli più elevati (compresi tra 17.5 e 19 °C) si registrano soprattutto nella penisola salentina, in Sardegna e nella Sicilia meridionale. È anche evidente l'omogeneità della media climatica su tutta la Pianura Padana.

I normali annuali della temperatura minima (Figura 4.5, pannello b) sono compresi tra il minimo di -3.3 °C della Cima Careser (in provincia di Trento a una quota

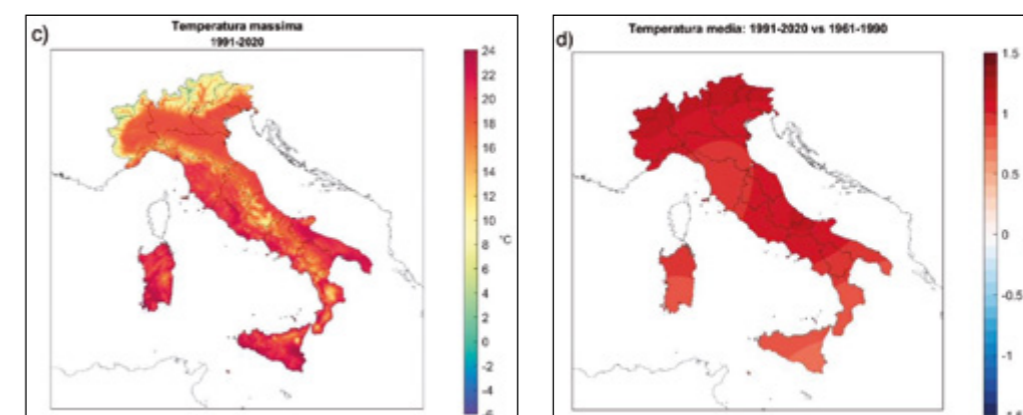
di 2600 m s.l.m.) e il massimo di 16.3 °C di Messina. I valori più bassi si riscontrano sull'intero arco alpino, con valori compresi fra -1.2 °C e 0 °C, mentre quelli più elevati si registrano principalmente in Puglia, Calabria, Sicilia e Sardegna con valori compresi fra 13 °C e 15 °C.

I normali annuali della temperatura massima (Figura 4.5, pannello c) sono compresi tra il valore minimo di 5.4 °C sul gruppo montuoso della Paganella, in provincia di Trento, e il massimo di 25.8 °C di Lentini, in provincia di Siracusa. I valori più bassi si registrano sull'arco alpino, mentre quelli più alti (superiori a 21 °C) si registrano principalmente su Puglia, Calabria, Sardegna e Sicilia. Nella Pianura Padana si osserva un'area piuttosto estesa con temperatura compresa fra 18 e 20 °C.

Nelle mappe di Figura 4.5, è evidente anche il gradiente di temperatura nord-sud che caratterizza la temperatura in Italia a causa della sua notevole estensione in latitudine. Inoltre, sono apparenti i segnali degli Appennini e, soprattutto, dell'arco Alpino. Come detto in precedenza, in Italia, a causa della notevole variazione in latitudine, della presenza del mare e della presenza di un'orografia complessa si determina tutta una varietà di microclimi locali che portano alla complessità dei segnali di temperatura di Figura 4.5.

Figura 4.5

Normali di temperatura medie del periodo 1991-2020:
a) temperatura media
b) temperatura minima
c) temperatura massima
d) differenza tra i valori normali di temperatura del trentennio 1991-2020 confrontato con i valori normali del trentennio 1961-1990. (Modificata da Fioravanti et al., 2022).



È anche interessante discutere brevemente l'andamento delle temperature nei vari mesi dell'anno. I normali di temperatura media più bassa si verificano, a seconda delle località, nei mesi di gennaio e di febbraio e sono compresi tra i -4 °C e -6 °C dell'arco Alpino e i 10 °C/13 °C delle zone costiere dell'Italia Meridionale e insulare. La Pianura Padana, che rappresenta un'area omogenea da un punto di vista climatico, ha valori di temperatura media che oscillano tra i 3 °C ed i 6 °C.

Le mappe dei normali di temperatura media più alti si verificano, a seconda delle località, nei mesi di luglio e agosto con valori che superano i 26 °C nell'Italia meridionale e lungo le coste, e nell'Italia insulare.

I normali di temperatura sono disponibili per i diversi periodi pregressi 1961-1990, 1971-2000 e 1981-2010 ed è interessante confrontare i normali del trentennio 1991-2020 con quelli dei trentenni precedenti. La Figura 4.5 (pannello d) mostra la differenza tra i normali climatici del periodo 1991-2020 e il periodo 1961-1990. Il confronto mostra inequivocabilmente il riscaldamento dell'Italia negli ultimi 30 anni rispetto al trentennio 1961-1990. Il riscaldamento è particolarmente evidente per

l'arco Alpino e per l'Appennino Centrale. Questi aspetti, ben predetti dalla teoria del cambiamento climatico, sono, tra gli altri, dovuti a meccanismi di feedback positivo che si innescano tra il riscaldamento superficiale e lo scioglimento delle nevi.

Il confronto dei normali di temperatura per il trentennio 1991-2020 con i trentenni 1971-2000 e 1981-2010 (non riportati) mostrano ancora che la temperatura media del trentennio 1991-2020 è stata più alta rispetto ai periodi precedenti, ma in misura minore rispetto al periodo 1981-2010. Questo risultato indica un progressivo riscaldamento dell'atmosfera nel corso degli ultimi decenni.

Vi sono altri studi sul clima italiano che sono concordi nell'osservare un aumento delle temperature nel clima recente (Brunetti et al., 2004; Bartolini et al., 2018; Todisco e Vergni, 2008). Questi studi stimano un aumento delle temperature medie di circa 1 °C tra il 1865 e il 2003. Questo valore va confrontato con la media globale di circa 0.74 ± 0.18 °C dal 1906 al 2005, a conferma del fatto che la temperatura del Mediterraneo sta aumentando più rapidamente rispetto alla media globale. Questi valori sono destinati a crescere nel clima futuro.

Andamento della precipitazione

La Figura 4.6 mostra l'andamento della precipitazione stagionale in Italia dal lavoro di Crespi et al. (2018) relativo al trentennio 1961-1990 e che si riferisce all'analisi di precipitazione a 30 secondi d'arco (1 km² circa). Dalla Figura 4.6 si può notare una notevole complessità di microclimi che variano in modo sostanziale con le stagioni dell'anno. Durante la stagione fredda si nota un gradiente di precipitazione nord-sud con precipitazioni che sono inferiori al nord e maggiori al sud. Questo gradiente si inverte con i mesi più caldi ed è anco-

ra più evidente. Nello specifico le regioni meridionali d'Italia, la Sardegna e la Sicilia mostrano precipitazioni generalmente inferiori a 100 mm per tutta la stagione estiva. Questi valori salgono a oltre 500 mm sull'arco alpino.

Soffermandosi sul Nord Italia è evidente il ruolo dell'orografia che, essendo una forzante per le precipitazioni, determina valori più alti di pioggia man mano che si sale in quota. Questo effetto è particolarmente evidente in primavera e autunno, in cui si passa da valori di 200-300 mm sulla

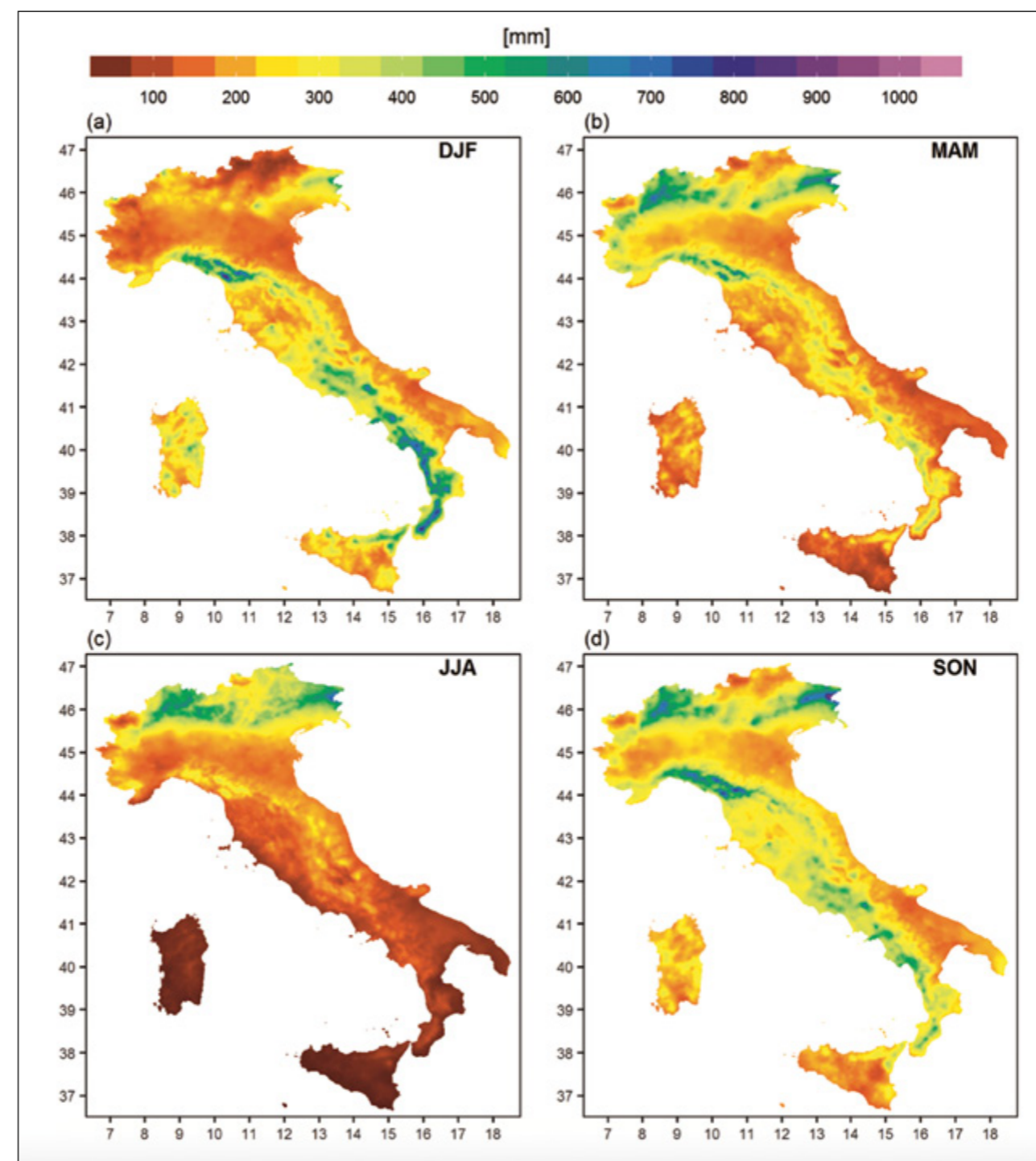


Figura 4.6

Distribuzione delle precipitazioni stagionali in Italia (da Crespi et al., 2018). DJF si riferisce all'inverno a) dicembre-gennaio-febbraio; MAM indica la primavera b) marzo-aprile-maggio; JJA indica l'estate c) giugno-luglio-agosto; SON indica l'autunno d) settembre-ottobre-novembre.

pianura Padana a valori di oltre 500-700 mm sull'arco alpino.

Per quanto riguarda l'Italia centrale e quella meridionale, il gradiente di precipitazione è in direzione ovest-est con valori più alti sul versante occidentale della penisola a causa della maggiore esposizione alle perturbazioni che viaggiano, generalmente, da ovest verso est. Questo gradiente è evidente in tutte le stagioni anche se tende a diminuire in estate.

Oltre al ruolo fondamentale dell'orografia, la precipitazione in Italia cambia a seconda dell'esposizione dei versanti. Nella Figura 4.7, che rappresenta la mappa annuale delle precipitazioni in Italia, si possono osservare le zone particolarmente esposte: la Liguria e la Toscana, il nord-est d'Italia e le Alpi Orobie. In queste aree la precipitazione supera abbondantemente i 2000 mm all'anno. Anche la mappa annuale di pioggia evidenzia la notevole varietà di microclimi esistenti in Italia. Si passa da valori di 2500 mm/anno per le aree più esposte alla precipitazione a valori inferiori a 700 mm/anno in alcune zone della Puglia, della Sicilia e della Sardegna.

Per quanto riguarda l'andamento delle precipitazioni va detto che è più difficile identificare, a differenza delle temperature, un trend uniforme su tutta Italia a causa della variabilità intrinseca della precipitazione (il rapporto segnale rumore è più basso rispetto alla temperatura). Altri problemi nell'analisi dei trend di precipitazione possono derivare dalla disomogeneità delle reti osservative, che possono essere pensate per scopi specifici, come descritto nel paragrafo 4.2. Vi è poi la variabilità climatica naturale che può mascherare l'andamento della precipitazione su un'area anche quando il trend di pioggia può essere sostanziale.

Dopo questa doverosa premessa, riportiamo i risultati di uno studio recente di Caporali et al. (2021) sull'andamento delle precipitazioni e del numero di giorni piovosi in Italia. Come detto in precedenza,

in questo studio si considerano i risultati di circa 60 studi precedentemente svolti sull'andamento delle precipitazioni e del numero di giorni piovosi. Questi studi sono stati pesati in modo opportuno per tener conto del numero di stazioni considerate e dell'area analizzata. Le serie disponibili sono state divise in tre gruppi: quelle corte (fino a 65 anni di dati), quelle lunghe (da 65 a 100 anni) e quelle secolari (oltre 100 anni), queste ultime costituite da pochi osservatori in Italia.

Anche se vi sono delle differenze tra i vari studi, il numero dei giorni piovosi mostra una chiara decrescita sia nel periodo più breve, ovvero per il primo gruppo, che nel periodo oltre 100 anni (terzo gruppo). Questo andamento è causato principalmente dalla decrescita osservata nella stagione invernale, mentre per le altre stagioni si ha un andamento meno chiaro. Tale andamento è osservato anche per le precipitazioni totali su tutto il territorio nazionale, ad eccezione del Nord Italia.

Questi risultati sono anche consistenti con l'analisi dell'indice SPI (Standardized Precipitation Index, si veda sul calcolo e l'utilizzo di indicatori anche il paragrafo 11.5), che rappresenta un indice per quantificare condizioni di siccità (o anche di umidità) confrontando la precipitazione accumulata su un periodo (ad esempio un mese) con le precipitazioni accumulate su quello stesso periodo per un periodo di riferimento lungo. Alcuni studi che mostrano un aumento della siccità per alcune aree d'Italia e del bacino del Mediterraneo sono: Bonaccorso et al. (2003); Bordi and Sutura, (2001); Di Lena et al. (2014).

Il fatto che la decrescita della precipitazione sia evidente per il periodo più breve e per il periodo oltre 100 anni è una manifestazione della variabilità climatica naturale, che non va confusa con aumenti o decrescite assolute del parametro. Esplorando i segnali fino a 65 anni e oltre i 100 anni è evidente la decrescita delle precipitazioni, mentre considerando l'analisi da

65 fino a 100 anni il segnale di decrescita non è più evidente.

Nel caso della regione Euroasiatica e del Mediterraneo, la North Atlantic Oscillation (NAO) è particolarmente importante. Questa si manifesta come un dipolo di alta e bassa pressione superficiale tra la regione delle medie latitudini (regione di alta pressione) e la regione polare (regione di bassa pressione) visibile soprattutto in inverno. Questo dipolo cambia nel corso degli anni con una propria variabilità naturale e ciclica, e può passare da fasi positive (in questo caso la bassa pressione si ritira verso il polo, l'Europa ha delle precipitazioni al di sopra della media, mentre il Mediterraneo e l'Italia sperimentano un periodo di siccità) a fasi negative (in questo caso la bassa pressione si espande verso le medie latitudini, l'Europa ha un numero maggiore di intrusioni di aria polare e un inverno più freddo, mentre il Mediterraneo e l'Italia sperimentano un periodo di precipitazione al di sopra della media). Esistono anche altri grandi pattern di pressione e circolazione a scala globale che possono influenzare, anche se in modo minore rispetto alla NAO, le precipitazioni d'Europa e d'Italia (ad esempio El Niño-Southern Oscillation-ENSO) e cambiamenti di questi

pattern di pressione cambiano in modo ciclico e naturale le precipitazioni e le temperature in Italia. La valutazione di trend di questi parametri deve sempre tener conto di questa variabilità naturale che potrebbe aumentare o confondere eventuali tendenze nei parametri atmosferici.

Per quanto riguarda l'occorrenza di eventi di pioggia estremi, nell'area Mediterranea esiste una sostanziale disomogeneità dell'identificazione dei trend (Costa e Soares, 2009; Gallego et al., 2006; Kostopoulou e Jones, 2005; López-Moreno et al., 2010; Norrant e Douguédroit, 2006). Tuttavia, per quanto riguarda l'area italiana, sembra ci sia una convergenza verso la rilevazione di trend in aumento degli eventi estremi (Alpert et al., 2002; Di Lena et al., 2014; Piccarreta et al., 2013). Nello specifico, si osserva una tendenza all'incremento del numero di eventi di nubifragio (Brunetti et al., 2001; Brunetti et al., 2002; Brunetti et al., 2004; Peñarrocha et al., 2002; Toreti et al., 2010), a fronte di un aumento della frequenza, durata ed intensità degli episodi siccitosi negli ultimi 20 anni (Romano et al., 2022), anche se con differenze stagionali e intensità diverse nelle varie regioni italiane (Baronetti et al., 2024).

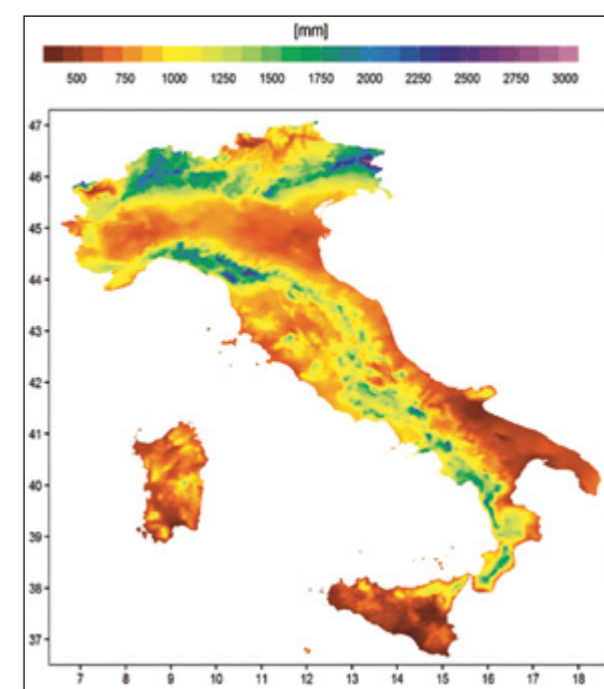


Figura 4.7
Distribuzione della precipitazione annuale in Italia
(da Crespi et al., 2018).

Cambiamento climatico

In questo paragrafo si introducono i temi generali del rapporto Climate Change 2022 del WG2 – Impatti, adattamento e vulnerabilità e si riportano i risultati di alcuni studi sulla siccità nel Mediterraneo e in Italia. Il rapporto è quello dell'edizione 2022 (IPCC, 2023). Rispetto alle precedenti edizioni del rapporto, l'IPCC presenta oggi un maggiore sforzo di integrazione tra le scienze naturali, sociali ed economiche, evidenzia il ruolo della giustizia sociale, delle conoscenze possedute da popolazioni indigene e comunità locali, e offre una riflessione sul fatto che, per affrontare con successo i rischi posti dall'aumento della temperatura media del pianeta, sia importante un'azione immediata e urgente. Quattro sono i tipi di rischio che si prospettano e che stiamo già vivendo per l'Europa, inclusa la sua parte meridionale e il bacino del Mediterraneo: a) rischi derivanti dalle ondate di calore; b) rischi per la produzione agricola; c) rischi di scarsità della risorsa idrica; d) rischi derivanti da una maggiore frequenza delle inondazioni (Ciampittiello et al., 2023).

Per i fenomeni connessi al regime termico, abbiamo già visto come i normali climatici indichino in modo inequivocabile l'aumento della temperatura dell'aria.

Per quanto riguarda il rischio delle ondate di calore, è atteso un aumento del loro numero e della loro intensità e lo stress da calore raddoppierà o triplicherà per un innalzamento della temperatura media del pianeta di 3 °C. La produzione agricola (rischio b) si ridurrà nel XXI secolo a causa della combinazione tra incremento delle temperature e siccità. La carenza di risorsa idrica è già oggi uno dei maggiori problemi nell'area del Mediterraneo a

causa dello squilibrio tra la domanda e la disponibilità della risorsa. Nel caso di un innalzamento ulteriore della temperatura media dell'atmosfera del pianeta (3 °C) il problema sarà ancor più drammatico nel Mediterraneo. Infatti, la regione Mediterranea si è riscaldata e continuerà a riscaldarsi ad un ritmo maggiore rispetto alla media delle regioni del globo. Questo sia per quanto riguarda la temperatura dell'atmosfera che quella del mare.

In molte regioni la capacità di adattamento è già notevolmente limitata. Se l'aumento della temperatura rispetto ai valori dell'epoca preindustriale supererà 1.5 °C, questa capacità di adattamento risulterà ancora più limitata e avrà un'efficacia ancora più ridotta. Di conseguenza, adattamento e riduzione dei rischi sono strettamente collegati alla mitigazione del cambiamento climatico in atto.

Tra i rischi collegati al cambiamento climatico in ambiente Mediterraneo c'è quello della scarsità idrica. Questo rischio è già presente per un riscaldamento di 1.5 °C della temperatura dell'aria rispetto alle condizioni del periodo pre-industriale (1850-1900) nell'Europa meridionale dove il numero di giorni con insufficienti risorse idriche, ovvero in cui la disponibilità è inferiore alla richiesta, è già del 18%. In uno scenario di riscaldamento globale di 2 °C, questi giorni passerebbero al 54%.

Uno studio recente sulla siccità nel Mediterraneo e sulla sua variazione nel clima futuro (Essa et al., 2023) ha considerato tre diversi tipi di siccità: quella meteorologica (tempi scala di 1 mese), quella agricola (tempi scala di 6 mesi) e quella idrologica (tempi scala di 1 anno). Sono state considerate le uscite dei modelli climatici

facenti parte del Coupled Model Inter-comparison Project—Phase 6 per quattro diversi scenari di sviluppo socio-economico (SSP1–2.6, SSP2–4.5, SSP3–7.0, e SSP5–8.5, paragrafo 4.5.2) per il periodo 2021-2060, utilizzando le rianalisi del periodo 1980-2014 per stimare la siccità nel clima attuale. Il confronto tra il clima futuro e quello attuale mostra un chiaro aumento della siccità che può variare da una crescita del 12% fino al 25% a seconda della regione del Bacino del Mediterraneo considerata. I risultati mostrano come i fenomeni siccitosi saranno più intensi nel sud del Mediterraneo e che la severità di questi eventi sarà particolarmente intensa per le scale temporali più lunghe (siccità agricola e siccità idrologica), ponendo dei problemi sociali per l'approvvigionamento di cibo e acqua. Le ragioni per l'aumento dei fenomeni siccitosi sono diverse da zona a zona e dipendono dal clima locale. Nel nord del Mediterraneo la siccità è causata principalmente dalla riduzione di precipitazione, mentre nel sud del Mediterraneo è causata più dall'aumento della temperatura.

Focalizzandosi sull'Italia, Baronetti et al. (2022) hanno considerato la variazione delle siccità nel Nord Italia tra il clima attuale (1971-2000), il clima del prossimo futuro (2021-2050) e il clima futuro (2071-2100). A tale scopo hanno considerato le uscite di vari modelli climatici regionali di EURO-CORDEX e MED-CORDEX per gli scenari Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 e 8.5. Sono state considerate sia le variazioni della siccità indotte dall'aumento dell'evapotraspirazione che quelle dovute alla riduzione della precipitazione. È stato trovato un aumento dei fenomeni siccitosi in entrambi gli scenari climatici ed in misura maggiore per lo scenario 8.5. L'aumento della temperatura è la principale causa dell'aumento della siccità nel Nord Italia per il clima del prossimo futuro e l'analisi conferma come la regione alpina sia la più sensibile d'Italia al cam-

biamento climatico. I fenomeni siccitosi, inoltre, tendono ad aumentare andando dalla pianura verso la montagna.

In uno lavoro più orientato verso l'agricoltura, Straffellini e Tarolli (2023) hanno studiato possibili condizioni di aridità nel nord-est Italia confrontando la situazione attuale (1980-2016) con quella del clima futuro (2071-2100) per lo scenario RCP 8.5. In questo caso è stato utilizzato l'indice di aridità FAO-United Nations Environment Programme per quantificare la variazione dell'aridità nell'area oltre a considerazioni sullo stato della vegetazione tramite l'indice Vegetation Health Index. I risultati mostrano come il nord-est dell'Italia stia evolvendo verso un regime di aridità e che il 76% delle risaie sarà a rischio nel clima futuro.

Guo e Montanari (2023) hanno focalizzato l'analisi della siccità nell'area attorno a Bologna, grazie alla possibilità di utilizzare una serie storica di dati di oltre 200 anni per la verifica delle prestazioni dei modelli di clima per l'area. Dopo aver applicato una correzione del bias, gli autori hanno mostrato come i modelli climatici del CMIP6 riproducessero la frequenza della siccità con buona affidabilità per il clima passato e presente. Allo stesso modo hanno notato come l'intensità e la durata dei periodi siccitosi fossero sottostimati dai modelli, mostrando l'importanza di una verifica rigorosa degli strumenti modellistici.

È importante sottolineare, infine, come in tutti gli studi precedenti sia stata posta particolare attenzione alla validazione delle uscite dei modelli climatici per la scala locale di applicazione, per accertarsi che i modelli fossero in grado di rappresentare le caratteristiche climatiche dell'area. Questa verifica, eventualmente a valle di processi di *downscaling* e correzione del bias, è un passo necessario prima di poter utilizzare le uscite dei modelli climatici per studi di previsione della siccità e scarsità idrica o per i calcoli di bilancio idrico nel clima futuro.

4.5

Strumenti modellistici di analisi e previsionali

4.5.1

Il quadro generale

Un altro strumento molto importante per lo studio e la previsione degli eventi di siccità e scarsità idrica è la modellistica numerica dell'atmosfera. Il contributo che i modelli numerici possono fornire dipende dall'orizzonte temporale che coprono. Due sono le categorie utili allo scopo: i modelli climatici e i modelli che fanno previsioni a scala cosiddetta substagionale (*subseasonal*). I primi tengono conto delle molte interazioni del sistema terra-atmosfera (atmosfera, idrosfera, biosfera, criosfera, litosfera) e sono gli strumenti fondamentali per la simulazione della variabilità del clima e delle proiezioni degli scenari climatici futuri. Questi modelli sono in grado di simulare l'evoluzione del clima attuale da un punto statistico, anche se non prevedono il tempo meteorologico giorno per giorno. Ad esempio, sono in grado di simulare l'evoluzione della temperatura superficiale dell'aria a livello globale, o dei continenti, o anche di aree sub-continentali come quella del Mediterraneo. Questi modelli possono essere utilizzati per prevedere futuri scenari climatici per diversi sviluppi sociali a loro volta connessi a differenti scenari di emissione di gas clima-alteranti. I rischi del cambiamento climatico nel Mediterraneo, discussi nel paragrafo precedente, sono derivati sulla base degli output di questi modelli.

Le previsioni che coprono l'orizzonte temporale superiore alle due settimane e inferiore ai due mesi vengono dette *subseasonal to seasonal* (S2S). Anche i modelli utilizzati per questo tipo di previsione, a causa della lunghezza temporale della simulazione, devono tener conto delle interazioni tra le diverse componenti del sistema Terra. Tuttavia, su questo orizzonte temporale, anche lo stato atmosferico nel momento dell'inizializzazione della previsione gioca un ruolo importante, in modo parzialmente simile a quanto avviene nelle previsioni meteorologiche a breve (48-72 h) e medio termine (fino a circa due settimane di previsione). Lo scopo di queste simulazioni numeriche è, quindi, quello di riprodurre la componente a grande scala della dinamica atmosferica per le settimane successive a partire dalle condizioni iniziali. Tuttavia, spingendosi oltre i limiti della predicibilità deterministica a scala sinottica, anche questa previsione è finalizzata a descrivere le anomalie rispetto a un clima di riferimento e una distribuzione probabilistica dello stato futuro dell'atmosfera e delle sue variabili. Coprendo un orizzonte previsionale di settimane, le simulazioni S2S, assieme alle osservazioni della Terra, hanno un ruolo fondamentale per definire e prevedere il rischio di siccità e mitigare gli effetti della scarsità idrica. Mentre le osservazioni della Terra con-

sentono di quantificare lo stato attuale del fenomeno, le previsioni S2S consentono di prevedere, ad esempio, le distribuzioni probabilistiche di precipitazioni e le temperature delle settimane successive, consentendo di individuare periodi critici con qualche anticipo e consentire l'implementazione di misure di mitigazione. I modelli utilizzati per questo tipo di previsioni devono essere in grado di utilizzare le fonti di predicibilità atmosferica che favoriscono i fenomeni di interesse, replicando le interazioni che possono regolare la dinamica atmosferica anche da remoto, come per esempio le interazioni tra aree tropicali e medie latitudini (ad esempio ENSO) o tra stratosfera e troposfera, per la quale si stanno esplorando nuove possibilità di predicibilità.

È infine importante sottolineare come le risoluzioni spaziali di questi modelli riescano a tenere conto solo parzialmente delle condizioni che si possono avere localmente, così come succede per le rianalisi meteorologiche globali. Per questa ragione le uscite dei modelli devono essere calibrate per applicazioni alla scala locale tramite varie tecniche che utilizzano dati raccolti alla scala locale (ad esempio tecniche di eliminazione del bias, Model Output Statistics, analisi dei quantili). Queste tecniche sono sempre necessarie quando si studiano le piene pluviali o i bilanci idrici a scala di bacino, in cui gli errori del modello e soprattutto la loro rappresentazione della scala locale può portare ad errori significativi.

4.5.2

I modelli climatici

Le proiezioni climatiche si basano sul presupposto che le condizioni climatiche future dipendano dall'evoluzione in atmosfera delle concentrazioni di gas climalteranti che, a loro volta, dipendono dall'attuazione o meno di politiche di mitigazione, ossia di riduzione delle emissioni di tali gas. Vengono, quindi, proposti vari scenari di sviluppo socio-economico che comportano diversi scenari di concentrazione dei gas serra, aerosol e gas chimicamente attivi (Moss et al., 2008). Questi diversi scenari sono chiamati percorsi rappresentativi di concentrazione (RCP) o, più recentemente, grazie alla maggiore integrazione degli scenari climatici proposti dall'IPCC con le scienze sociali ed economiche, Shared Socioeconomic Pathways (SSP).

Le proiezioni climatiche sono ottenute attraverso l'utilizzo di modelli climatici. Questi sono degli strumenti di simulazio-

ne molto complessi che rappresentano le diverse componenti del sistema climatico terrestre e le loro interazioni. I modelli climatici si sono evoluti a partire dall'inizio degli anni '70 del secolo scorso; all'inizio sono state elaborate le diverse componenti del sistema climatico terrestre che sono state, successivamente, accoppiate e sempre più raffinate. Al contempo, è aumentata la risoluzione spaziale dei modelli climatici passando dai circa 500 km dell'inizio degli anni '90 alle attuali risoluzioni di meno di 100 km. Questo ha consentito di descrivere con maggiore dettaglio fisico le interazioni tra le diverse componenti del sistema climatico terrestre consentendo di comprendere meglio i meccanismi del clima e l'impatto del cambiamento climatico sul ciclo idrologico. Non va dimenticato, inoltre, che l'evoluzione dei modelli climatici, così come degli altri modelli utilizzati per lo studio dell'atmosfera, di-

pende anche dallo sviluppo tecnologico. Nello specifico l'avvento dei sistemi di calcolo High Performance Computing, all'inizio degli anni 2000, con centinaia di migliaia di core di calcolo, ha consentito un'accelerazione significativa nello studio del cambiamento climatico e nella quantificazione del suo impatto. Negli ultimi anni si stanno affermando sistemi di calcolo ibrido CPU/GPU (Central Processing Unit/Graphics Processing Unit) con i quali si possono utilizzare anche tecniche di intelligenza artificiale assieme ai modelli climatici. Questa rivoluzione, che è appena iniziata, avrà uno spazio sempre maggiore nei modelli del futuro consentendo vantaggi non solo computazionali ma, nel caso dei modelli climatici in particolare, di poter simulare fenomeni sempre più complessi, non risolvibili con le tecniche tradizionali, e di utilizzare al meglio le osservazioni della Terra.

Gli scenari proposti per lo studio del cambiamento climatico sono quattro (IPCC, 2023; Lee et al., 2021).

Tra questi i due più comunemente usati ad alta risoluzione sono due:

RCP8.5

(comunemente associato all'espressione "Business-as-usual", o "Nessuna mitigazione") crescita delle emissioni ai ritmi attuali.

Tale scenario assume, entro il 2100, concentrazioni atmosferiche di CO₂ triplicate o quadruplicate (840-1120 ppm) rispetto ai livelli preindustriali (280 ppm).

RCP2.6

In questo scenario si suppone una mitigazione aggressiva del cambiamento climatico con emissioni dimezzate entro il 2050. In questo scenario si suppone che l'emissione dei gas serra sia azzerata in 60 anni. In queste condizioni è improbabile che si superino i 2 °C di aumento della temperatura media globale rispetto ai livelli preindustriali.

I modelli climatici possono essere eseguiti sia sulla scala globale che a scala regionale. Oltre a quantificare il cambiamento climatico a scala planetaria, i modelli climatici globali possono fornire le condizioni iniziali e al contorno ai modelli a scala regionale, che consentono di svolgere uno zoom fisico su opportune aree per studiare in maggiore dettaglio il cambiamento climatico. In generale, le proiezioni climatiche possono essere ricondotte a un'area specifica in due modi diversi: il *downscaling* dinamico e quello statistico. Il *downscaling* dinamico consiste nell'utilizzo di un modello climatico a scala regionale che, innestandosi in un modello climatico globale da cui vengono acquisite le condizioni iniziali e al contorno, produce le proiezioni climatiche su un'area limitata. Ciò garantisce una rappresentazione più dettagliata delle caratteristiche geografiche e dei processi fisici che influenzano il clima nel dominio di interesse. A tal proposito è importante sottolineare come la comunità scientifica stia iniziando a considerare in modo sempre più rilevante i cambiamenti del clima indotti dalle attività antropiche alla scala locale. Detto in altri termini, occorre considerare, in questo tipo di proiezioni, anche le alterazioni climatiche che sono prodotte dalle pratiche antropiche in quella specifica area.

Nel *downscaling* statistico si individua, per il presente e il passato, robuste relazioni empirico-statistiche fra le variabili a larga scala (*predictor*) simulate da un modello globale e le variabili osservate a scala locale (*predictand*) oggetto di interesse e successivamente si applicano tali relazioni alle simulazioni future. Il vantaggio del *downscaling* statistico rispetto a quello dinamico sta nella possibilità di ottenere e utilizzare proiezioni climatiche su un singolo punto stazione e di non essere dispendioso in termini di calcolo. Il limite maggiore consiste invece nell'assumere l'ipotesi, tutt'altro che scontata, che le re-

lazioni empirico-statistiche individuate siano valide anche per il clima futuro. Infine, il *downscaling* di tipo statistico può essere applicato anche alle uscite dei modelli a scala regionale per rendere ancora più specifiche le uscite del modello climatico per l'area di interesse.

Il cambiamento climatico viene quantificato tramite la differenza delle variabili meteorologiche (temperatura, pioggia, vento, radiazione etc.) tra l'andamento simulato per il periodo futuro di interesse, valutato sulla base di proiezioni climatiche, e l'andamento simulato su un periodo di riferimento, ovvero su un periodo attuale o del recente passato. Infine, il cambiamento climatico è valutato sia in termini di valori medi (prendendo in considerazione le medie delle stagioni o di interi anni), sia in termini di valori estremi (piogge intense giornaliere, giorni consecutivi senza pioggia, numero di giorni consecutivi con temperatura oltre una certa soglia etc.), quei valori cioè che rappresentano eventi straordinari rispetto alle medie di periodi più o meno lunghi.

Un'importante esperienza che va citata nell'ambito della modellistica climatica è quella del CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) che è un contesto sperimentale standard in cui si studiano le simulazioni dei modelli climatici accoppiati e che consente di valutare i punti di forza e di debolezza dei modelli accoppiati al fine di migliorarne le prestazioni. Alle attività del CMIP, ora giunto alla sesta fase (Eyring et al., 2016), partecipano molti modelli sviluppati da varie strutture internazionali. Il confronto statistico tra le varie simulazioni modellistiche consente anche di avere una stima delle incertezze associate alle ricostruzioni climatiche nelle diverse aree del globo.

Ad oggi le risoluzioni spaziali orizzontali dei modelli a scala climatica sono

dell'ordine di 50-100 km, mentre le risoluzioni spaziali dei modelli a scala regionale sono dell'ordine di 15 km. Come detto in precedenza, i modelli climatici, così come quelli meteorologici, hanno una serie di errori che riguardano sia le parametrizzazioni numeriche che le parametrizzazioni fisiche. A questo si aggiunge il fatto che i modelli hanno una risoluzione spaziale finita che può causare errori di rappresentatività notevoli quando si applicano le loro uscite ad aree specifiche. L'analisi meteorologica (paragrafo 4.2.5) tende a ridurre questi problemi forzando le uscite del modello ad avvicinarsi alle osservazioni, cosa che non può essere svolta per le proiezioni climatiche poiché non sono note le osservazioni future. Questo comporta che le uscite dei modelli climatici siano analizzate con cura per le zone in cui le si vuole applicare, soprattutto se queste zone hanno delle dimensioni relativamente piccole (dell'ordine delle centinaia di chilometri quadrati). Occorre sempre valutare se il modello è in grado di rappresentare le caratteristiche climatiche dell'area per il clima attuale o passato, eventualmente dopo l'applicazione di tecniche statistiche che consentano di riportare le uscite del modello climatico all'area specifica, in modo da accertarsi che le principali caratteristiche fisiche del clima locale siano ben rappresentate nel modello e nelle sue proiezioni. Va anche sottolineato come i parametri atmosferici abbiano una diversa predicibilità e questo può determinare che una proiezione climatica che funziona bene per un parametro possa non andare bene per un altro. Per questa ragione i modelli climatici sono molto più in accordo sulle proiezioni di temperatura di quanto lo siano per la precipitazione. Quest'ultima, infatti, è il risultato di tutta una serie di processi che avvengono in natura, e questo la rende intrinsecamente più imprevedibile rispetto ad altri parametri atmosferici.

Oltre alle simulazioni climatiche che hanno orizzonti temporali molto lunghi (decenni), vi sono strumenti modellistici che consentono di avere delle previsioni a lungo termine (oltre un mese) e che possono risultare estremamente utili nell'implementazione di sistemi di *early-warning* e dunque nella gestione anticipata delle crisi da deficit idrico. Tra queste esperienze, quella relativa alla previsione sub-seasonal to seasonal (S2S) è la più recente nello scenario modellistico internazionale e ha coinvolto molti enti internazionali in un progetto patrocinato dal WCRP (World Climate Research Programme) e dal programma WWRP (World Weather Research Program) del OMM (<http://www.s2sprediction.net>) conclusosi a fine 2023. All'interno del progetto è stato sviluppato un database (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/s2s/>) al quale vengono tuttora conferite anche le simulazioni effettuate dal CNR-ISAC col modello GLOBO.

Gli obiettivi delle previsioni S2S sono i seguenti:

- migliorare la previsione su scala sub-stagionale con particolare attenzione agli eventi estremi;
- promuovere lo sviluppo di tematiche di ricerca che possano essere utilizzate per scopi applicativi;
- capitalizzare le esperienze dei vari centri di ricerca nella previsione globale per rispondere alle domande di importanza per i servizi climatici.

È utile descrivere le principali caratteristiche di uno dei sistemi previsionali dell'iniziativa S2S, quello del CNR-ISAC basato sul modello globale GLOBO (Malguzzi et al., 2011). GLOBO è un modello a circolazione generale idrostatico a punti di griglia sulla sfera. Esso deriva dal modello idrostatico regionale BOLAM (Davolio et al., 2020) e ne condivide le equazioni che ne descrivono la dinamica e le parametrizzazioni dei processi fisici. A differenza del BOLAM, il GLOBO contempla anche processi esterni all'atmosfera, come quelli di oceano e criosfera, poiché, a causa del lungo tempo di previsione, possono contribuire alla predicibilità atmosferica su scala substagionale. Nello specifico, le anomalie di temperatura superficiale del mare del giorno di inizializzazione sono parzialmente rilassate verso il valore climatologico ogni cinque giorni di simulazione. Il valore iniziale di copertura del ghiaccio è invece tenuto costante se maggiore (minore) della climatologia in autunno-inverno (estate-primavera), altrimenti viene rilassato verso il valore climatologico. La climatologia della temperatura superficiale del mare della copertura di ghiaccio e la loro tendenza sono calcolati dalla rianalisi climatologica sul periodo di 30 anni (1981-2010) e sono calcolate come medie su 5 giorni. Il GLOBO è implementato alla risoluzione di circa 0.7×0.5 gradi latitudine-longitudine e viene utilizzato per produrre, a cadenza settimanale, previsioni mensili probabilistiche (Figura 4.8, Mastrangelo e Malguzzi, 2019).

L'*ensemble* è costituito da 41 membri che sono inizializzati alle 00, 06, 12, 18 del mercoledì (10 membri per ogni tempo) e 00 UTC del giovedì (un membro) a

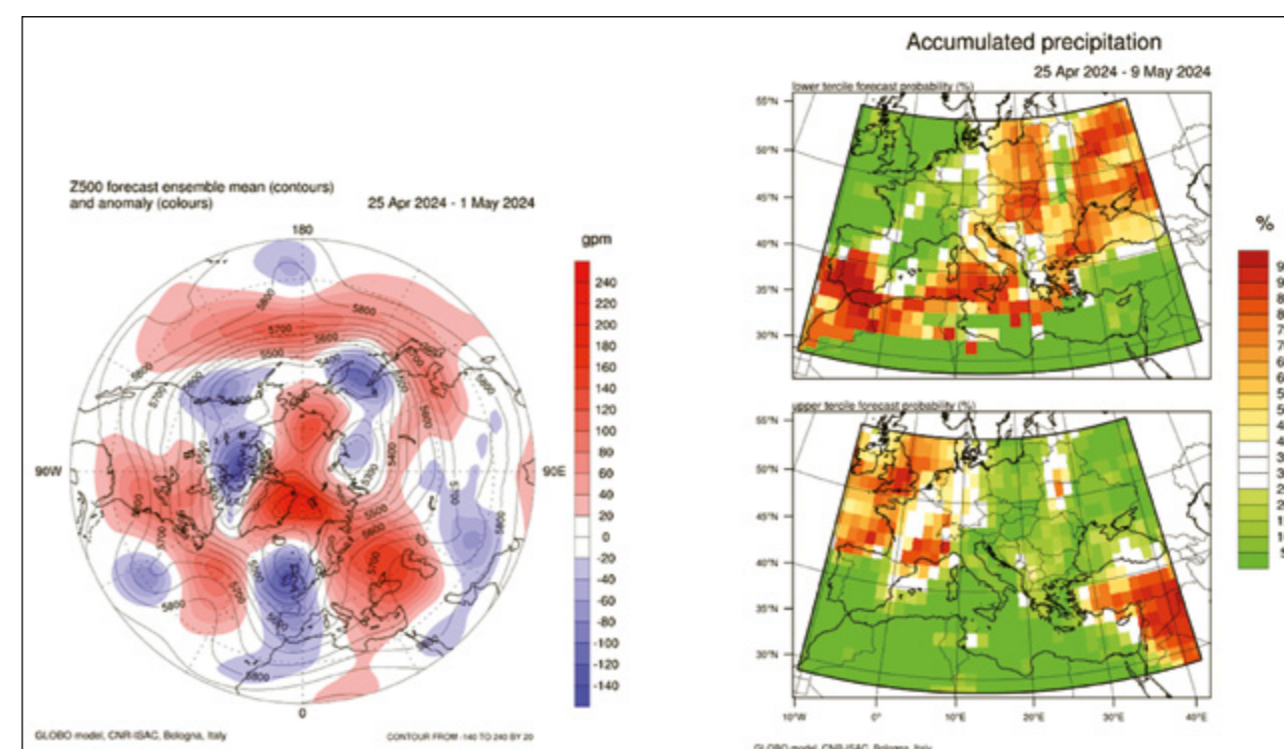
partire dalle simulazioni del modello GEFS (Global Ensemble Forecast System) del NCEP (National Centers for Environmental Prediction). Inoltre, un sistema previsionale S2S necessita della creazione di simulazioni in modalità previsionale ma per un periodo del passato (*reforecast*). Tali simulazioni costituiscono infatti la climatologia di riferimento del modello e vengono utilizzate per il calcolo e la calibrazione delle anomalie e delle probabilità previste. Nel caso del modello GLOBO, un recente dataset di *reforecast*, costituito da un ensemble di 8 membri le cui condizioni iniziali sono ottenute dalle rianalisi ERA5, copre il periodo 2001-2020. I membri dell'ensemble sono inizializzati ogni 5 giorni (73 inizializzazioni all'anno).

Dal punto di vista predittivo, la scala *subseasonal* è intrinsecamente più difficile di altre a causa della variabilità delle sorgenti di predicibilità e per la difficoltà nel simularne i meccanismi e le interazioni (ad esempio quelle tra zona tropicale e medie latitudini). Tuttavia, nonostante le difficoltà nell'ottenere previsioni utili anche sulla terza settimana di previsione, vi

sono periodi durante i quali la predicibilità è alta (*windows of opportunity*) e anche fenomeni estremi possono essere previsti con 3 o 4 settimane d'anticipo (Domeisen et al., 2022). Anche per questo motivo, le previsioni S2S sono in rapida espansione, con una crescente domanda di applicazioni previsionali da parte degli utenti. Per esempio, in Italia, la previsione S2S del CNR-ISAC trova applicazione nell'ambito di alcune operazioni che vengono coordinate a livello nazionale dal Dipartimento della protezione civile (Mastrangelo et al., 2021). Il contributo previsionale a tali attività muove anche nella direzione della gestione della siccità su varie scale e quindi della gestione della risorsa idrica. La gestione della risorsa idrica dipende da vari fattori e dal punto di vista modellistico è auspicabile la sinergia tra strumenti modellistici di tipo meteo-climatico e idrologico. Tuttavia, realtà più avanzate da questo punto di vista mostrano che l'utilizzo della previsione S2S nel settore della gestione ed emergenza idrica è una strada che, sebbene necessiti ulteriori sviluppi, risulta già attuabile e auspicabile (Sengupta et al., 2022).

Figura 4.8

Anomalia di altezza di geopotenziale prevista dal modello GLOBO per la settimana 25 aprile-1 maggio 2024 (a sinistra), probabilità della cumulata prevista nel terzile inferiore e superiore mediata sul periodo 25 aprile-9 maggio 2024 (a destra).



Scendendo di orizzonte temporale, vi sono poi le previsioni deterministiche e probabilistiche su intervalli temporali di qualche giorno (fino ad una settimana). Queste simulazioni hanno una risoluzione spaziale maggiore di quelle S2S (dell'ordine di 3-10 km a seconda dei casi) e possono essere utilizzate per definire meglio l'intensità e la portata degli eventi meteorologici sulle diverse aree di interesse. Questo tipo di previsioni, inoltre, consentono di avere una maggiore precisione spaziale di dove si andranno a localizzare le precipitazioni. In questa classe rientrano i modelli meteorologici che svolgono le previsioni meteorologiche per i giorni successivi. L'approccio di questi modelli alla previsione può essere sia di tipo deterministico che probabilistico e, a oggi, hanno raggiunto un consolidato livello di affidabilità, rendendoli adatti per molte applicazioni a valle della previsione numerica. Questi modelli sono, generalmente, ad area limitata, ovvero consentono di poter svolgere delle previsioni numeriche su una particolare area della terra utilizzando le condizioni iniziali e al con-

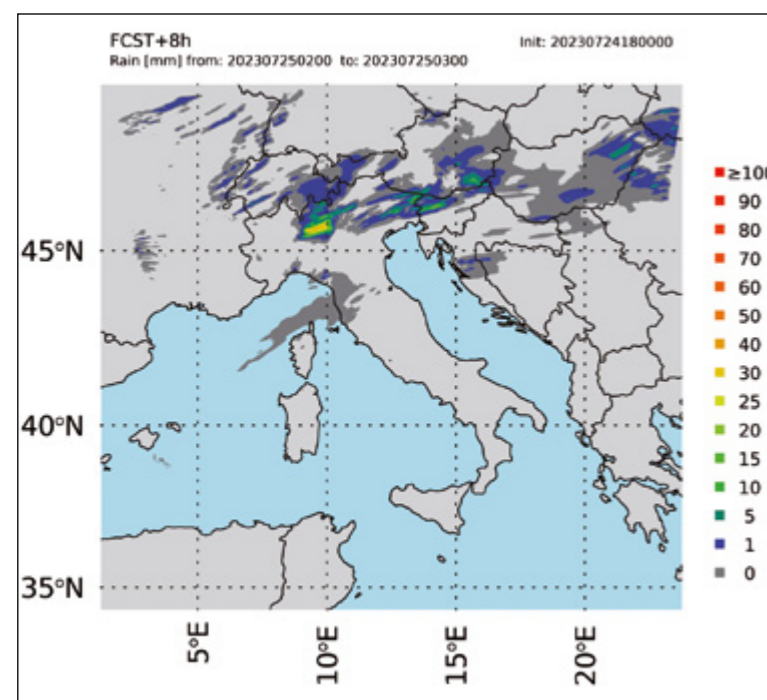
torno dinamiche fornite dai modelli a scala globale e svolgono uno zoom fisico su una specifica area del globo.

Le condizioni iniziali dei modelli ad area limitata possono essere ulteriormente raffinate alla scala locale con il processo di assimilazione dati. In questo metodo si utilizzano le osservazioni, anche a scala locale, e una uscita del modello numerico per determinare in modo ottimale lo stato iniziale dell'atmosfera. Quest'ultimo viene utilizzato per far ripartire il modello numerico con una conoscenza più accurata delle condizioni iniziali e, generalmente, si ha un miglioramento delle prestazioni del modello soprattutto nelle prime ore di previsione (Figura 4.9).

I modelli ad area limitata possono essere eseguiti sia in configurazione deterministica che probabilistica. L'approccio probabilistico ha alcuni vantaggi: a) la media di ensemble ha delle prestazioni migliori, in media, rispetto ai singoli membri dell'ensemble poiché l'operatore di media consente di filtrare le componenti più imprevedibili dell'atmosfera; b) consente di avere una quantificazione dell'affidabilità della previsione meteorologica tramite la quantificazione dello spread delle corse dei membri dell'ensemble; c) fornisce una probabilità di previsione degli eventi grazie alla conoscenza, seppur parziale, della funzione di densità di probabilità di accadimento di un certo evento.

L'approccio deterministico, d'altro canto, usa risoluzioni spaziali maggiori, consentendo di risolvere fenomeni a scala locale in maggior dettaglio e richiede minori risorse di calcolo. Va anche ricordato che vari modelli deterministici possono essere combinati in una sola uscita con un approccio di *multi-model ensemble* (Torcasio et al., 2016).

Figura 4.9
Esempio di previsione della pioggia ad 1h per l'evento notevole di Milano della notte del 25 luglio 2023. È evidente la profonda cella convettiva prevista sulla città.



Prima di concludere questa sezione relativa alla modellistica di previsione e di studio del cambiamento climatico (modelli fisicamente basati), accenniamo ai modi in cui l'intelligenza artificiale (AI) può aiutare lo studio del cambiamento climatico.

L'intelligenza artificiale è un processo informatico attraverso il quale una macchina viene istruita a compiere ragionamenti complessi, tipici del cervello umano. In generale, le tecniche AI si stanno rivelando molto efficaci nel risolvere le problematiche legate all'atmosfera. In ambito operativo, ad esempio, il GraphCast di Google sta mostrando come l'intelligenza artificiale sia in grado di simulare bene l'evoluzione di alcuni campi atmosferici (vento, temperatura, umidità, pressione) con grande affidabilità, avendo prestazioni simili, o addirittura migliori, dei corrispondenti modelli a circolazione generale, da cui hanno "imparato" (Lam et al., 2023).

Uno dei vantaggi della AI è la velocità con cui si possono simulare i processi complessi. I modelli globali per lo studio del clima e per le previsioni a scala S2S sono molto complessi e richiedono delle notevoli capacità di calcolo. Parte della simulazione di questi processi potrebbe essere affidata ad algoritmi di intelligenza artificiale per velocizzare le simulazioni e per richiedere minori capacità di calcolo rispetto ai modelli fisicamente basati. C'è però qualcosa in più: a volte i processi da simulare sono molto complessi e non si riesce a formularli adeguatamente nei modelli fisicamente basati. In questo caso, le tecniche di AI possono essere utilizzate per "simulare" questi processi e tener-

ne conto all'interno dei modelli fisicamente basati. Nello specifico, il Machine Learning (ML), è l'algoritmo utilizzato dall'intelligenza artificiale per fornire dei risultati predittivi. Questi algoritmi sono fondati su principi statistici e consentono ai sistemi di apprendere e migliorare in modo autonomo. Fondamentalmente, il ML abilita le macchine a estrarre informazioni utili da dati complessi, apprendendo modelli e pattern difficilmente individuabili attraverso approcci di programmazione tradizionali. Ad esempio, con il ML si possono attribuire a un certo contenuto di acqua e di idrometeore presente nei corpi nuvolosi una certa radiazione osservata da un satellite e utilizzare questa corrispondenza per fare una previsione di quella che sarà la radiazione osservata in corrispondenza di una nuova distribuzione delle idrometeore e dei corpi nuvolosi. Questo tipo di simulazione richiede molto tempo di calcolo con i metodi tradizionali e il ML sta offrendo un nuovo approccio alla loro soluzione.

Infine, le tecniche di AI possono essere molto valide nel rimuovere eventuali errori sistematici dei modelli fisicamente-basati. In questo caso, l'intelligenza artificiale contribuisce a chiarire meglio l'entità del fenomeno e il suo ruolo nell'ambito del sistema climatico. Vi sono alcune difficoltà tecniche di natura oggettiva che si stanno man mano superando (i linguaggi di programmazione e le architetture di calcolo dei modelli fisicamente basati e delle tecniche AI sono diversi), ma le tecniche di AI saranno sempre più importanti nella modellistica climatica e nello studio delle problematiche del cambiamento climatico.

4.6

Le domande di ricerca

Le tematiche di ricerca per la stima del bilancio idrico in atmosfera, soprattutto in connessione al cambiamento climatico, si sviluppano attorno al miglioramento delle previsioni a lungo termine (da 1 settimana fino ad 2-3 mesi) e al miglioramento delle prestazioni dei modelli climatici, soprattutto alla scala regionale e locale. Queste tematiche contengono sia deficit di tipo conoscitivo che di tipo informativo.

Una delle tematiche di interesse comune ai modelli climatici e ai modelli S2S è la riduzione degli errori. Questa problematica rientra, più in generale, nello sviluppo dei modelli atmosferici. Si tratta di individuare gli errori sistematici del modello dovuti alle parametrizzazioni fisiche e numeriche e di apportare correzioni che consentano il miglioramento delle prestazioni.

Per i modelli climatici è importante migliorare ed estendere la rappresentazione delle interazioni tra le varie componenti del sistema climatico terrestre. Questo, unito all'uso di modelli climatici a una maggiore risoluzione spaziale, consentirà di avere proiezioni climatiche sempre più affidabili alla scala locale. Inoltre, occorre sempre più tenere conto dei contributi che le attività antropiche locali possono avere sul clima locale, migliorando la descrizione dell'uso del suolo nei modelli climatici. Va poi ridotta l'incertezza nella definizione degli scenari di sviluppo socio-economici così come vanno migliorate ed estese le osservazioni della Terra per poter migliorare la descrizione delle interazioni tra le diverse componenti che costituiscono il sistema climatico terrestre.

Nel caso dei modelli S2S occorre trovare nuovi spunti di predicibilità a medio e lungo termine soprattutto nelle interazioni

a distanza tra gli eventi atmosferici e i centri di pressione a scala planetaria (NAO, ENSO), nonché alle interazioni tra la stratosfera e la troposfera. Inoltre, le condizioni iniziali del modello sono ancora importanti per la previsione S2S ed è necessario fare ricerca sulle tecniche di assimilazione dati per il miglioramento della conoscenza delle condizioni iniziali utilizzate in questi modelli, soprattutto per parametri come l'umidità del suolo, lo stato della vegetazione e lo stato del mare che hanno un ruolo chiave nel miglioramento della previsione e della stima del bilancio idrico su tempi scala maggiori delle due settimane.

Ci sono poi delle tematiche di ricerca importanti anche a valle delle uscite delle proiezioni climatiche o delle previsioni S2S. Ad esempio occorre comporre in modo ottimale, per una certa regione, le uscite di diversi modelli globali utilizzando tecniche di multi-model ensemble per migliorare la previsione. Occorre anche migliorare le tecniche di correzione a-posteriori delle uscite modellistiche con metodi statistici e con tecniche di intelligenza artificiale. Occorre infine sviluppare e applicare tecniche di *downscaling* delle previsioni su scala subseasonal e climatica per l'accoppiamento con modelli idrologici a scala di bacino. La previsione di deflusso così ottenibile può essere finalizzata alla gestione delle risorse idriche, oltre che per la difesa contro gli eventi calamitosi.

Rispondere in maniera completa ed efficace a queste, seppur incomplete, domande di ricerca consentirà di migliorare non solo la stima del bilancio idrico in atmosfera ma anche di prevedere e gestire meglio le problematiche legate alla siccità e scarsità idrica.

4.7

Referenze bibliografiche

Allen R.G., P.L.S., R.D., S.M., 1998. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage. Rome. ISBN 92-5-104219-5.

Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S., Manes, A., 2002. The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values. *Geophys. Res. Lett.* 29. <https://doi.org/10.1029/2001GL013554>

Avolio, E., Federico, S., 2018. WRF simulations for a heavy rainfall event in southern Italy: Verification and sensitivity tests. *Atmos Res* 209. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.03.009>

Baronetti, A., Dubreuil, V., Provenzale, A., Fratianni, S., 2022. Future droughts in northern Italy: high-resolution projections using EURO-CORDEX and MED-CORDEX ensembles. *Clim. Change* 172, 22. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03370-7>

Baronetti, A., Menichini, M., Provenzale, A., 2024. Vegetation response to droughts: The case of northern Italy. *Int J Climatol.* 44, 501–520. <https://doi.org/10.1002/joc.8340>

Bartolini, G., Grifoni, D., Magno, R., Torrigiani, T., Gozzini, B., 2018. Changes in temporal distribution of precipitation in a Mediterranean area (Tuscany, Italy) 1955–2013. 38, 1366–1374. <https://doi.org/10.1002/joc.5251>

Blakeslee, R.J., Lang, T.J., Koshak, W.J., Buechler, D., Gatlin, P., Mach, D.M., Stano, G.T., Virts, K.S., Walker, T.D., Cecil, D.J., Ellett, W., Goodman, S.J., Harrison, S., Hawkins, D.L., Heumesser, M., Lin, H., Maskey, M., Schultz, C.J., Stewart, M., Bateman, M., Chanrion, O., Christian, H., 2020. Three Years of the Lightning Imaging Sensor Onboard the International Space Station: Expanded Global Coverage and Enhanced Applications. *J. Geophys. Res. Atmos.* 125. <https://doi.org/10.1029/2020JD032918>

Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., Sutera, A., 2003. Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *Water Resour. Manag.* 17, 273–296. <https://doi.org/10.1023/A:1024716530289>

Bonanno, R., Lacavalla, M., Sperati, S., 2019. A new high-resolution Meteorological Reanalysis Italian Dataset: MERIDA. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 145, 1756–1779. <https://doi.org/10.1002/qj.3530>

Bordi, I., Sutera, A., 2001. Fifty years of precipitation: some spatially remote teleconnections. *Water Resour Manag* 15, 247–280. <https://doi.org/10.1023/A:1013353822381>

Brunetti, M., Buffoni, L., Mangianti, F., Maugeri, M., Nanni, T., 2004. Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Glob. Planet. Change* 40, 141–149. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00104-8)

Brunetti M., Colacino, M., Maugeri, M., Nanni, T., 2001. Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996. *Int J Climatol* 21, 299–316. <https://doi.org/10.1002/joc.613>

Brunetti, M., Maugeri, M., Monti, F., Nanni, T., 2004. Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years. *J. Geophys. Res. Atmos.* 109. <https://doi.org/10.1029/2003JD004296>

Brunetti, M., Maugeri, M., Nanni, T., Navarra, A., 2002. Droughts and extreme events in regional daily Italian precipitation series. *Int J Climatol* 22, 543–558. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00104-8)

Caporali, E., Lompi, M., Pacetti, T., Chianello, V., Fatichi, S., 2021. A review of studies on observed precipitation trends in Italy. *Int J Climatol* 41. <https://doi.org/10.1002/joc.6741>

- Ciampittiello, M., Saidi, H., Kamburska, L., Zaupa, S., Boggero, A., 2023. Temporal evolution of lake level fluctuations under flood conditions and impacts on the littoral ecosystems. *J Limnol.* 81. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2022.2141>
- Costa, A.C., Soares, A., 2009. Trends in extreme precipitation indices derived from a daily rainfall database for the South of Portugal. *Int J Climatol.* 29, 1956–1975. <https://doi.org/10.1002/joc.1834>
- Crespi, A., Brunetti, M., Lentini, G., Maugeri, M., 2018. 1961–1990 high-resolution monthly precipitation climatologies for Italy. *Int J Climatol.* 38, 878–895. <https://doi.org/10.1002/joc.5217>
- Davolio, S., Malguzzi, P., Drofa, O., Mastrangelo, D., Buzzi, A., 2020. The Piedmont flood of November 1994: a testbed of forecasting capabilities of the CNR-ISAC meteorological model suite. *Bull. Atmos. Sci. Technol.* 1, 263–282. <https://doi.org/10.1007/s42865-020-00015-4>
- Di Lena, B., Vergni, L., Antenucci, F., Todisco, F., Mannocchi, F., 2014. Analysis of drought in the region of Abruzzo (Central Italy) by the Standardized Precipitation Index. *Theor Appl Climatol.* 115, 41–52. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0876-2>
- Domeisen, D.I. V., White, C.J., Afargan-Gerstman, H., Muñoz, Á.G., Janiga, M.A., Vitart, F., Wulff, C.O., Antoine, S., Ardilouze, C., Batté, L., Bloomfield, H.C., Brayshaw, D.J., Camargo, S.J., Charlton-Pérez, A., Collins, D., Cowan, T., del Mar Chaves, M., Ferranti, L., Gómez, R., González, P.L.M., González Romero, C., Infanti, J.M., Karozis, S., Kim, H., Kolstad, E.W., LaJoie, E., Lledó, L., Magnusson, L., Malguzzi, P., Manrique-Suñén, A., Mastrangelo, D., Materia, S., Medina, H., Palma, L., Pineda, L.E., Sftsos, A., Son, S.-W., Soret, A., Strazzo, S., Tian, D., 2022. Advances in the Subseasonal Prediction of Extreme Events: Relevant Case Studies across the Globe. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 103, E1473–E1501. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-02211>
- Essa, Y.H., Hirschi, M., Thiery, W., El-Kenawy, A.M., Yang, C., 2023. Drought characteristics in Mediterranean under future climate change. *NPJ Clim Atmos Sci* 6, 133. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00458-4>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Inter-comparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci Model Dev* 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Federico, S., 2011. Verification of surface minimum, mean, and maximum temperature forecasts in Calabria for summer 2008. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 11, 487–500. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-487-2011>
- Federico, S., Avolio, E., Bellecci, C., Lavagnini, A., Colacino, M., Walko, R.L., 2008. Numerical analysis of an intense rainstorm occurred in southern Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 8. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-19-2008>
- Fioravanti, G., Frascchetti, P., Lena, F., Perconti, W., Piervitali, E., 2022. I normali climatici 1991-2020 di temperatura e precipitazione in Italia. ISPRA, Stato dell'Ambiente 99/2022, ISBN 978-88-448-1120-4.
- Follansbee, W. A., Oliver, V. J., 1975. A Comparison of Infrared Imagery and Video Pictures in the Estimation of Daily Rainfall from Satellite Data. Washington, DC.
- Gallego, M.C., García, J.A., Vaquero, J.M., Mateos, V.L., 2006. Changes in frequency and intensity of daily precipitation over the Iberian Peninsula. *J. Geophys. Res. Atmos.* 111. <https://doi.org/10.1029/2006JD007280>
- Giorgi, F., 2006. Climate change hotspots. *Geophys. Res. Lett.* 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Guo, R., Montanari, A., 2023. Historical rainfall data in northern Italy predict larger meteorological drought hazard than climate projections. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 27, 2847–2863. <https://doi.org/10.5194/hess-27-2847-2023>
- Hargreaves G.H., Samani, Z. A., 1982. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Div.* 108, 225–230
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Iguchi, T., Kozu, T., Meneghini, R., Awaka, J., Okamoto, K., 2000. Rain-Profiling Algorithm for the TRMM Precipitation Radar. *J. Appl. Meteorol.* 39, 2038–2052. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<2038:R-PAFTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<2038:R-PAFTT>2.0.CO;2)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Kidwell, K. B., et al., 2014. NOAA KLM USER'S GUIDE with NOAA-N, N Prime, and MetOp SUPPLEMENTS.
- Klaes, K.D., Cohen, M., Buhler, Y., Schlüssel, P., Munro, R., Luntama, J. P., von Engel, A., Clérigh, E.Ó., Bonekamp, H., Ackermann, J., Schmetz, J., 2007. An Introduction to the EUMETSAT Polar system. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 88, 1085–1096. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-7-1085>
- Koppen, W., 1936. Das geographische System der Klimate. *Handbuch der Klimatologie* 1.
- Kostopoulou, E., Jones, P.D., 2005. Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean. *Meteorol. Atmos. Phys.* 89, 69–85. <https://doi.org/10.1007/s00703-005-0122-2>
- Kummerow, C., Barnes, W., Kozu, T., Shiue, J., Simpson, J., 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 15, 809–817. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0809:T-TRMMT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0809:T-TRMMT>2.0.CO;2)
- Kunkee, D.B., Poe, G.A., Boucher, D.J., Swadley, S.D., Hong, Y., Wessel, J.E., Uliana, E.A., 2008. Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46, 863–883. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.917980>
- Lam, R., Sanchez-Gonzalez, A., Willson, , Wirnsberger, P., Fortunato, M., Alet, F., Ravuri, S., Ewalds, T., Eaton-Rosen, Z., Hu, W., Merose, A., Hoyer, S., Holland, G., Vinyals, O., Stott, J., Pritzel, A., Mohamed, S., Battaglia, P., 2023. Learning skillful medium-range global weather forecasting. *Science* (1979) 382. <https://doi.org/10.1126/science.adi2336>
- Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021: Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, <http://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
- López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Kenawy, A., 2010. Trends in daily precipitation on the northeastern Iberian Peninsula, 1955–2006. *Int. J. Climatol.* 30, 1026–1041. <https://doi.org/10.1002/joc.1945>
- Malguzzi, P., Buzzi, A., Drofa, O., 2011. The Meteorological Global Model GLOBO at the ISAC-CNR of Italy Assessment of 1.5 Yr of Experimental Use for Medium-Range Weather Forecasts. *Weather Forecast* 26, 1045–1055. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00027.1>
- Mastrangelo, D., Delli Passeri, L., Campione, E., Malguzzi, P., 2021. The contribution of S2S forecasts to the activities of the Italian Civil Protection Department. *S2S Newsletter* 17.
- Mastrangelo, D., Malguzzi, P., 2019. Verification of Two Years of CNR-ISAC Subseasonal Forecasts. *Weather Forecast* 34, 331–344. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0091.1>
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J. F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J. P., Zurek, M., 2008. *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies.* Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 132 pp.

- Narrant, C., Douguédroit, A., 2006. Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950–2000). *Theor. Appl. Climatol.* 83, 89–106. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0163-y>
- Peñarrocha, D., Estrela, M.J., Millán, M., 2002. Classification of daily rainfall patterns in a Mediterranean area with extreme intensity levels: the Valencia region. *Int. J. Climatol.* 22, 677–695. <https://doi.org/10.1002/joc.747>
- Piccarreta, M., Pasini, A., Capolongo, D., Lazzari, M., 2013. Changes in daily precipitation extremes in the Mediterranean from 1951 to 2010: the Basilicata region, southern Italy. *Int. J. Climatol.* 33, 3229–3248. <https://doi.org/10.1002/joc.3670>
- Raffa, M., Reder, A., Marras, G.F., Mancini, M., Scipione, G., Santini, M., Mercogliano, P., 2021. VHR-REA_IT Dataset: Very High Resolution Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis over Italy by COSMO-CLM. *Data (Basel)* 6, 88. <https://doi.org/10.3390/data6080088>
- Romano, E., Petrangeli, A.B., Salerno, F., Guyennon, N., 2022. Do recent meteorological drought events in central Italy result from long-term trend or increasing variability? *Int. J. Climatol.* 42, 4111–4128. <https://doi.org/10.1002/joc.7487>
- Sengupta, A., Singh, B., DeFlorio, M.J., Raymond, C., Robertson, A.W., Zeng, X., Waliser, D.E., Jones, J., 2022. Advances in Sub-seasonal to Seasonal Prediction Relevant to Water Management in the Western United States. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 103, E2168–E2175. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0146.1>
- Shedekar, V.S., Brown, L.C., Heckel, M., King, K.W., Fausey, N.R., Harmel, R.D., 2009. Measurement Errors in Tipping Bucket Rain Gauges under Different Rainfall Intensities and their implication to Hydrologic Models, in: 2009 Reno, Nevada, June 21 - June 24, 2009. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI. <https://doi.org/10.13031/2013.27308>
- Skofronick-Jackson, G., Petersen, W.A., Berg, W., Kidd, C., Stocker, E.F., Kirschbaum, D.B., Kakar, R., Braun, S.A., Huffman, G.J., Iguchi, T., Kirstetter, P.E., Kummerow, C., Meneghini, R., Oki, R., Olson, W.S., Takayabu, Y.N., Furukawa, K., Wilheit, T., 2017. The Global Precipitation Measurement (GPM) Mission for Science and Society. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 98, 1679–1695. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00306.1>
- Steinkopf, J., Engelbrecht, F., 2022. Verification of ERA5 and ERA-Interim precipitation over Africa at intra-annual and interannual timescales. *Atmos. Res.* 280, 106427. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106427>
- Straffelini, E., Tarolli, P., 2023. Climate change-induced aridity is affecting agriculture in Northeast Italy. *Agric. Syst.* 208, 103647. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103647>
- Todisco, F., Vergni, L., 2008. Climatic change in Central Italy and their potential effects on corn water consumption. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.08.014>
- Torcasio, R.C., Federico, S., Calidonna, C.R., Avolio, E., Drofa, O., Landi, T.C., Malguzzi, P., Buzzi, A., Bonasoni, P., 2016. Three-model ensemble wind prediction in southern Italy. *Ann. Geophys.* 34, 347–356. <https://doi.org/10.5194/angeo-34-347-2016>
- Toreti, A., Xoplaki, E., Maraun, D., Kuglitsch, F.G., Wanner, H., Luterbacher, J., 2010. Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 1037–1050. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1037-2010>
- Vinayak, S. S., Brown, L. C., Heckel, M., King, K. W., Fausey, N. R., Harmel, R. D., 2009. Measurement Errors in Tipping Bucket Rain Gauges under Different Rainfall Intensities and their implication to Hydrologic Models, in: 2009 Reno, Nevada, June 21 - June 24, 2009. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI. <https://doi.org/10.13031/2013.27308>
- Wei, L., Jiang, S., Ren, L., Zhang, L., Wang, M., Duan, Z., 2020. Preliminary Utility of the Retrospective IMERG Precipitation Product for Large-Scale Drought Monitoring over Mainland China. *Remote Sens. (Basel)* 12, 2993. <https://doi.org/10.3390/rs12182993>
- Weinman, J.A., Guetter, P.J., 1977. Determination of Rainfall Distributions from Microwave Radiation Measured by the Nimbus 6 ESMR. *J Appl Meteor* 16, 437–442. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0437:-DORDFM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0437:-DORDFM>2.0.CO;2)
- Wilheit, T.T., Chang, A.T.C., V. Rao, M.S., Rodgers, E.B., Theon, J.S., 1977. A Satellite Technique for Quantitatively Mapping Rainfall Rates over the Oceans. *J. Appl. Meteor.* 16, 551–560. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0551:ASTF-QM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0551:ASTF-QM>2.0.CO;2)
- World Meteorological Organization (WMO), 2023. Guide to Climatological Practices. WMO, Geneva.
- Wu, G., Qin, S., Mao, Y., Ma, Z., Shi, C., 2022. Validation of Precipitation Events in ERA5 to Gauge Observations during Warm Seasons over Eastern China. *J. Hydrometeorol.* 23, 807–822. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-21-0195.1>

How to cite

Federico, S., Coscarelli, R., Mastrangelo D., Panegrossi, G., Piervitali, E., Torcasio, R.C., Vulpiani, G. 2024. "Il regime meteo-climatico", in *Siccità, scarsità e crisi idriche*, Emanuele Romano, Ivan Portoghesi (a cura di), Habitat signa 1, 103-143. Roma: Cnr Edizioni. <https://doi.org/10.69115/habitatsigna-2024-1/04>

Emanuele Romano è ricercatore presso l'Istituto di ricerca sulle acque del CNR. Laureato in Fisica presso l'Università degli studi di Milano, ha conseguito il Dottorato di ricerca in Scienze della terra, svolgendo parte dell'attività presso l'École des Mines di Parigi. Autore di più di cinquanta pubblicazioni scientifiche, negli ultimi anni ha focalizzato le proprie ricerche sulla valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche e sui sistemi di approvvigionamento, con particolare riferimento agli eventi siccitosi. Membro della Commissione grandi rischi del Dipartimento della protezione civile, settore "Rischio da incendi boschivi e da deficit idrico" dal 2023, collabora con numerosi enti pubblici (Ministero dell'ambiente, ISPRA, Istat, Autorità di distretto) e gestori del servizio idrico integrato.

Ivan Portoghese è ricercatore presso l'Istituto di ricerca sulle acque del CNR. Laureato in Ingegneria civile presso il Politecnico di Bari, ha conseguito un Dottorato di ricerca in Idrologia sviluppando modelli matematici per la caratterizzazione dei bacini idrografici soggetti a forte variabilità climatica stagionale e inter-annuale. Negli ultimi anni si è occupato dello sviluppo e validazione di metodi e strumenti per la pianificazione e la gestione delle risorse idriche pubblicando numerosi articoli scientifici su varie riviste internazionali. È inoltre coinvolto nello sviluppo di studi e di politiche per la gestione sostenibile delle risorse idriche a supporto di istituzioni ed enti operanti nel settore.

Sempre più spesso i mezzi di comunicazione riportano eventi di siccità sul territorio italiano con impatti drammatici sulla popolazione e sugli ecosistemi.

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Forum scientifico intergovernativo sul cambiamento climatico istituito presso le Nazioni Unite, da tempo segnala l'intensificarsi di tali fenomeni nell'area mediterranea a seguito del cambiamento climatico.

Che fare? E quale può essere il ruolo della comunità scientifica a supporto di una *governance* dell'acqua? Il presente volume, redatto dal Gruppo di lavoro "Siccità, scarsità e crisi idriche" del Dipartimento di scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente del CNR, con il supporto di altre Istituzioni (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, Dipartimento della protezione civile, Struttura commissariale per l'adozione di interventi urgenti connessi al fenomeno della scarsità idrica), ha visto il coinvolgimento di quasi cento ricercatrici e ricercatori che hanno tentato di dare risposta a tali quesiti fornendo elementi tecnico-scientifici a supporto di tutti i soggetti che, con diversi ruoli, contribuiscono alla *governance* dell'acqua.

