

See discussions, stats, and author profiles for this publication at:
<https://www.researchgate.net/publication/259889744>

I cambiamenti Climatici in Italia : Evidenze, Vulnerabilità e Impatti

CHAPTER · JANUARY 2010

CITATION

1

READS

158

8 AUTHORS, INCLUDING:



[P. Lionello](#)

Università del Salento

184 PUBLICATIONS 3,048 CITATIONS

SEE PROFILE

[Marina Baldi](#)

Italian National Research Council

64 PUBLICATIONS 652 CITATIONS

SEE PROFILE



[Carlo Cacciamani](#)

Arpa Emilia-Romagna

64 PUBLICATIONS 545 CITATIONS

SEE PROFILE



[R. Tomozeiu](#)

Arpa Emilia-Romagna

53 PUBLICATIONS 385 CITATIONS

SEE PROFILE

3.

EVENTI CLIMATICI ESTREMI: TENDENZE ATTUALI E CLIMA FUTURO SULL'ITALIA

Piero Lionello*, Marina Baldi**, Michele Brunetti***, Carlo Cacciamani****, Maurizio Maugeri*****, Teresa Nanni***, Valentina Pavan****, Rodica Tomozeiu****

* *Università degli Studi del Salento, Lecce*

** *IBIMET-CNR, Roma*

*** *ISAC-CNR, Bologna*

**** *ARPA-SIMC, Bologna*

***** *Università degli Studi di Milano, Milano*

Revisori:

Michele Colacino – *ISAC-CNR, Roma*

Antonio Speranza – *Università degli Studi di Camerino, Camerino*

SOMMARIO

Gli estremi meteo-climatici, senza adeguate misure di adattamento e compensazione, hanno effetti negativi sulla società, la salute, le attività economiche, il territorio ed è pertanto importante analizzarne le tendenze attuali e le proiezioni per il clima futuro. Attualmente, sul territorio italiano è in corso un aumento delle temperature massime e minime giornaliere, collegato a un aumento della temperatura media e coerente con l'aumento della frequenza delle ondate di calore (triplicatasi negli ultimi 50 anni). Inoltre, tutto il territorio italiano è caratterizzato da una forte diminuzione del numero di giorni poco piovosi, mentre la frequenza di quelli con precipitazioni intense è in aumento in alcune regioni dell'Italia settentrionale. Allo stesso tempo è evidente, in particolare per il nord-ovest e per il sud, una tendenza verso periodi siccitosi di maggior durata. Questi cambiamenti hanno caratteristiche diverse per temperatura e precipitazioni. L'aumento di temperature minime e massime giornaliere è associato ad una traslazione della distribuzione statistica delle temperature verso valori più caldi, mentre per la precipitazione la diminuzione (aumento) della frequenza percentuale degli eventi di bassa (elevata) intensità (rispettivamente) è il segnale di una maggiore deviazione delle "code" rispetto alla media della distribuzione (come descritta dal valore del "parametro di scala"). Quest'ultima evoluzione viene spesso definita "estremizzazione" del clima. Non sono stati fino ad ora evidenziati in modo convincente incrementi delle mareggiate (altezze estreme delle onde marine). L'aumento delle frequenze delle acque alte nella laguna Veneta è riconducibile a un aumento del livello relativo del mare, non all'intensità degli eventi meteorologici. Per il periodo 2070-2100 ci si attende un generale aumento (il cui valore dipende dai

futuri scenari di emissione) sia dei valori minimi che dei valori massimi di temperatura, con, di conseguenza, una diminuzione del numero di giorni di gelo e un incremento delle ondate di calore. Cambiamenti futuri degli estremi di precipitazione sul territorio italiano non risultano analizzati in modo specifico e non è possibile fare affermazioni precise. L'analisi di future mareggiate suggerisce una diminuzione delle onde estreme e un comportamento più complesso per le inondazioni nell'Adriatico settentrionale, con una diminuzione degli eventi intensi che non esclude un aumento della probabilità di eventi eccezionali.

3.1 INTRODUZIONE

Questo capitolo si occupa di eventi climatici estremi, delle loro tendenze e delle valutazioni dei loro possibili cambiamenti in futuri scenari climatici. Molti estremi sono associati a situazioni pericolose, possono produrre vittime e avere effetti disastrosi su società, economia, attività umane, salute, agricoltura, patrimonio forestale, con implicazioni negative su produzione e utilizzo di energia, attività marittime, difesa e gestione di coste e porti, protezione civile e assicurazioni. Questa sezione introduttiva comprende alcune precisazioni sulla natura degli eventi estremi e sui metodi per la loro valutazione.

Un evento estremo è in questo articolo definito come un evento raro in base alla distribuzione di probabilità della variabile che lo caratterizza. Quindi un evento estremo è tale perché si verifica molto raramente. La definizione di raro è in parte soggettiva. In genere dovrebbe corrispondere a una probabilità almeno inferiore al 10%, cioè avere un valore inferiore al 10° percentile o superiore al 90° percentile della corrispondente distribuzione probabilistica, ma è buona consuetudine considerare probabilità inferiori. Eventi selezionati sulla base della scelta di un percentile possono essere più propriamente definiti come “intensi”, mentre la qualifica di “estremi” andrebbe riservata a quelli che seguono comportamenti statistici ben definiti su base matematica, quali quelli della distribuzione generale dei valori estremi (GEV). La stessa letteratura scientifica è purtroppo non sempre chiara su questa distinzione. Questo articolo non intende discutere le importanti distinzioni metodologiche e semantiche implicite in questa distinzione, ma si limita a chiarire sempre quale sia la definizione adottata nei risultati presentati in questa rassegna e a connotare in generale nel testo come estremi anche eventi selezionati sulla base percentile. Dalla definizione di estremo segue che la soglia in intensità che caratterizza un evento estremo varia da luogo a luogo, con la stagione e nel tempo, se il clima non è stazionario. Estremo è quindi un concetto relativo: ondate di caldo, siccità, mareggiate che sono eventi estremi per una regione o per un periodo dell'anno non lo sono necessariamente in altre situazioni. Inoltre, la denominazione di eventi estremi comprende fenomeni eterogenei, quali, appunto, ondate di caldo (come quella dell'estate 2003 nell'Europa occidentale), prolungate siccità, piogge intense, straripamenti di fiumi, inondazioni costiere, cicloni e mareggiate di forte intensità.

Il carattere intrinsecamente anomalo degli eventi estremi è alla base della loro pericolosità. In genere le costruzioni, le difese, le coltivazioni, le attività umane sono strutturate per fronteggiare uno spettro di eventi la cui intensità rientra in un intervallo centrato attorno ad un valore medio. Se un evento esce da questo intervallo di tolleranza, che non può essere reso arbitrariamente grande senza incorrere in costi proibitivi (e normalmente inutili), è potenzialmente pericoloso perché non sono disponibili le contromisure per contrastarlo. Quindi gli eventi estremi causano vittime, danni economici, possono avere effetti traumatici sulle strutture economiche e sociali.

Gli eventi estremi sono una presenza ricorrente, benché per definizione rara, del clima. Si sono verificati in epoche passate e sono stati occasionalmente disastrosi, come evidente non solo dalle serie strumentali disponibili nella seconda metà del XX secolo, che ne consentono una valutazione precisa, ma anche da precedenti osservazioni e dalle innumerevoli cronache che ne documentano la presenza in tutti i periodi storici. Mentre nelle epoche passate, in mancanza di adeguate tecnologie, i loro effetti sono stati spesso considerati un costo inevitabile, attualmente sono a disposizione mezzi per quantomeno ridurre gli impatti negativi. Pertanto, è evidente l'importanza di valutarne correttamente l'intensità, le tendenze in atto e i loro cambiamenti in futuri scenari climatici. Infatti, la pericolosità degli eventi estremi viene accentuata quando le difese e le strategie per contrastarli non vengono sufficientemente sviluppate, perché viene sottovalutata la probabilità che essi si verifichino. Questa cattiva pianificazione accade indipendentemente da un cambiamento climatico ed il problema della corretta valutazione dell'intensità degli estremi nel clima attuale riveste un'importanza fondamentale.

L'analisi degli estremi richiede dati con adeguata risoluzione spazio temporale per garantire un campionamento ragionevolmente completo. Elementi caratterizzanti possono essere la determinazione di valori massimali (o minimali), l'identificazione di una soglia, cioè un valore al di sopra, o al di sotto, del quale eventi vengono osservati molto raramente (ad esempio il 1° percentile, ossia il valore al di sotto del quale si colloca l'1% degli eventi) o una soglia superiore (ad esempio il 99° percentile, superato solo dall'1% degli eventi), una stima della distribuzione di probabilità di una variabile, in particolare dei valori corrispondenti a probabilità basse. In generale, per lo studio degli estremi viene fatto ampio uso di indicatori che ne descrivono il comportamento. In particolare per temperatura e precipitazione esiste una ricca letteratura scientifica sull'argomento sintetizzata negli indicatori proposti in progetti europei quali MICE, STARDEX e dal comitato ETCCDI-CRD (CLIVAR-WCRP), focalizzati principalmente su estremi di precipitazione e temperatura, ma che si possono, per analogia, estendere ad altre variabili, come cicloni, onde, inondazioni costiere. Uno strumento concettuale fondamentale è fornito dalla distribuzione generale dei valori estremi, GEV, che è la forma, nota a priori, della distribuzione probabilistica degli eventi rari, provata da teoremi matematici di valenza generale. La GEV con-

sente sulla base dei dati osservati di stimare il valore di soglia corrispondente a una frequenza di accadimento molto bassa (ad esempio il valore che ci si attende in media di superare una volta ogni 100 anni).

L'intrinseca rarità degli estremi determina la grande difficoltà di valutarne con precisione la distribuzione statistica e le tendenze. Gli eventi estremi sono associati ad un'alta dose di casualità, hanno un andamento necessariamente irregolare, e tendenze sistematiche eventualmente presenti sono difficilmente individuabili con ragionevole affidabilità statistica. Gli estremi sono quindi dei pessimi indicatori di un mutamento climatico, che è più facilmente identificabile dalle variazioni di valori medi, come la temperatura e la precipitazione stagionale o annuale, eventualmente mediate su regioni di sufficiente estensione.

Questo capitolo descrive, per le classi di eventi estremi più rilevanti dal punto di vista climatico, da un lato quanto noto sulle tendenze attuali (sezione 2), dall'altro quanto risulta dalle proiezioni calcolate in scenari climatici futuri (sezione 3). Le classi di estremi considerati comprendono temperatura, precipitazione, ondate di calore, cicloni e mareggiate. Questa lista non intende essere esaustiva degli eventi meteorologici estremi che includono altre fenomenologie quali raffiche di vento, temporali e grandinate, tornado. Tuttavia, per tali fenomeni non esistono pubblicazioni scientifiche che consentano di documentarne le variazioni climatiche di intensità o frequenza. La sezione conclusiva sintetizza i risultati più significativi e indica quali siano le lacune conoscitive che è più urgente colmare.

3.2 TENDENZE ATTUALI DEGLI EVENTI ESTREMI

Questo capitolo analizza le tendenze attuali di estremi climatici legati a precipitazione, temperatura ed eventi meteorologici, che hanno importanti ricadute pratiche. Estremi di temperatura e ondate di calore hanno marcati impatti sulla salute pubblica e sul consumo energetico durante i mesi estivi. Estremi di precipitazione hanno riflessi su problematiche quali il dissesto idrogeologico e la gestione delle risorse idriche, entrambi di estrema importanza per un territorio complesso come l'Italia. Periodi siccitosi hanno impatti negativi sulla produzione agricola e la gestione delle risorse idriche, anch'esse tematiche di estrema importanza per l'Italia. Le mareggiate producono danni alle coste, ne aumentano l'erosione e richiedono la pianificazione di adeguate difese costiere e strutture portuali per contenerne gli effetti.

3.2.1 Temperatura: minimi e massimi giornalieri

Per l'analisi delle tendenze della temperatura sono necessarie serie temporali sufficientemente lunghe e omogenee. Il comportamento delle temperature massime e

minime giornaliere sul territorio italiano è sintetizzato da tre serie temporali di temperature giornaliere relative all'Italia settentrionale, a quella peninsulare (all'incirca a nord e a sud del 43° parallelo), e all'intero territorio nazionale (Brunetti et al., 2006). Queste tre serie derivano a loro volta da 67 serie termometriche di stazioni distribuite sul territorio italiano per il periodo 1951-2004 provenienti dal data-base dell'Aeronautica Militare, omogeneizzate su base giornaliera trasferendo le correzioni sui dati giornalieri con un algoritmo trigonometrico (vedasi Brunetti et al., 2003, per un'applicazione a dati pluviometrici). Le tre serie sono state costruite mediando le serie delle singole stazioni espresse come anomalie rispetto al ciclo annuale (stimato su un periodo comune) per ottenere serie continue e accettabilmente omogenee nonostante i periodi senza misure presenti in alcune stazioni.

Gli estremi sono stati analizzati in termini del 90° percentile superiore delle temperature massime e del 10° percentile inferiore delle temperature minime. L'analisi mostra un significativo aumento del numero di eventi al di sopra del 90° percentile (pari a 44 ± 9 giorni/50 anni per le temperature massime e a 47 ± 9 giorni/50 anni per le minime, a livello annuale, con significatività superiore al 99% in base al Mann Kendall test) ed una diminuzione del numero di eventi al di sotto del 10° percentile (pari a -20 ± 6 giorni/50 anni per le massime e a -24 ± 5 giorni/50 anni per le minime, a livello annuale, con significatività superiore al 99%). Il contributo maggiore a questi trend è dato dalla stagione estiva, mentre in inverno si hanno raramente tendenze significative. Questo risultato è in accordo con quanto osservato per altre regioni del Mediterraneo, soprattutto per quanto riguarda le tendenze estive (Kostopoulou and Jones, 2005).

È importante comprendere se questo aumento degli estremi di temperatura sia imputabile a cambiamenti della variabilità, ovvero se la distribuzione delle temperature abbia subito una variazione nella sua forma o sia traslata rigidamente verso temperature più elevate. Infatti, l'aumento dei percentili superiori ed inferiori delle temperature massime e minime in Italia è sovrapposto a quello della temperatura media che è stato pari a circa 1,7 °C nell'arco degli ultimi due secoli, con un forte contributo dato dagli ultimi 50 anni, durante i quali l'incremento registrato è di circa 1,4 °C (Brunetti et al., 2006). La variazione temporale delle soglie di un set di 21 percentili, dal primo al 99° (1°, 5°, 10°, 15°, ..., 90°, 95° e 99°) sono mostrati in Fig. 3.1 (per l'intero territorio nazionale, ITA, per la parte settentrionale, N, e per quella meridionale, S) dove si evidenzia che i trend sono tutti confrontabili entro una deviazione standard, ovvero le distribuzioni delle temperature minime e massime hanno subito uno spostamento rigido verso valori più elevati. Pertanto, l'aumento del numero di eventi al di sopra del 90° percentile e il calo del numero di eventi al di sotto del 10° percentile, sia per massime che per minime, risulta essere dovuto ad uno spostamento della distribuzione delle temperature giornaliere e non ad una variazione della sua forma. Quella che viene talvolta definita come "estremizzazione" del clima, ossia un incremento della separazione fra valori estremi e medi, non trova riscontro nel comportamento delle temperature, e il verificarsi di eventi caratterizzati da temperature "insolitamente" elevate negli anni più recenti è unicamente da imputare ad un aumento della media e non della variabilità.

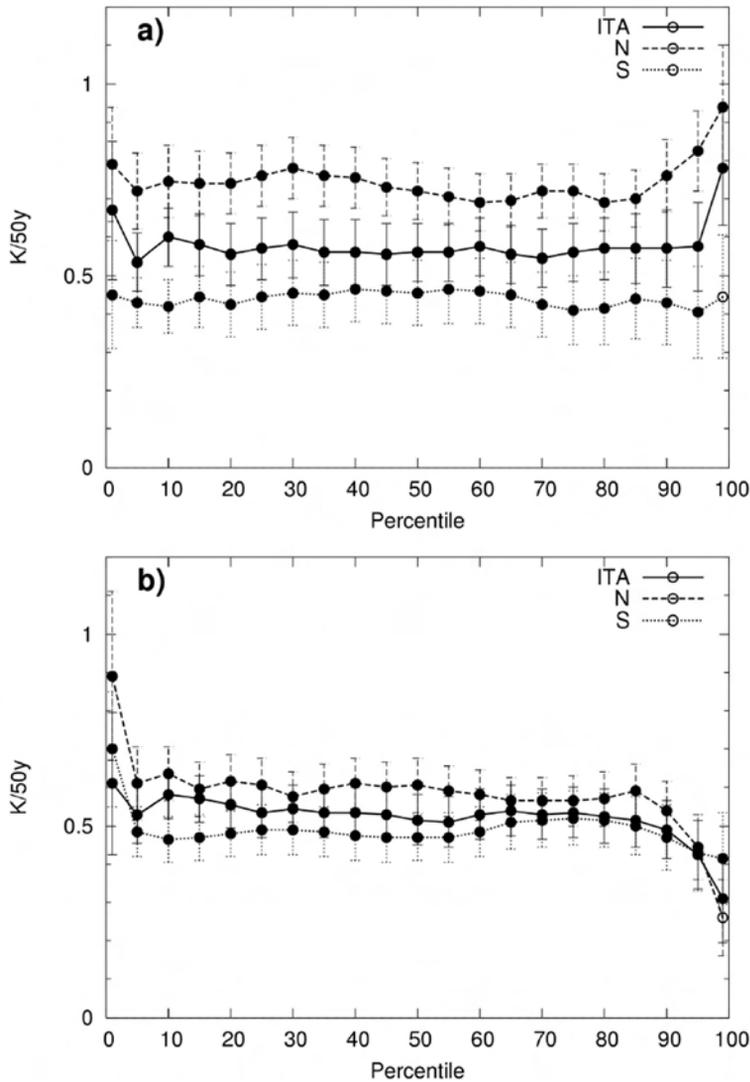


Fig. 3.1 – Tendenze delle soglie dei percentili per le temperature massime (a) e minime (b) per l'intero territorio nazionale (ITA), per l'Italia settentrionale (N) e per l'Italia meridionale (S). I cerchi neri indicano valori significativi del trend (> 90%), quelli bianchi indicano valori non significativi.

3.2.2 Ondate di calore

In questo documento “ondata di calore” (Heat Wave) è definita come un periodo di almeno 6 giorni consecutivi durante il quale la temperatura osservata supera il 90° percentile (stimato su un periodo di riferimento sufficientemente lungo), come proposto da Klein Tank and Konnen (2003). Un esempio di periodo caldo di intensità e durata eccezionale si è verificato nell'estate del 2003, producendo

circa 7000 vittime in Italia. In realtà esso è risultato da tre ondate di calore successive: 9 Giugno-2 Luglio, 10-30 Luglio, 3-13 Agosto. Le temperature massime furono raggiunte in quest'ultimo periodo: ad esempio a Roma, il 6 Agosto furono misurati 38,8 °C (valore comunque inferiore a quello dell'8 Agosto 1956: 39, 9 °C). Un'analisi per il territorio nazionale è stata effettuata utilizzando le stazioni della rete UCEA (Ufficio Centrale di Ecologia Agraria) per il periodo estivo (Giugno-Settembre) dal 1951 al 2003 (Baldi et al., 2006). L'alta correlazione (che varia dall'88% in Giugno al 94% in Settembre) tra le anomalie della temperatura alla superficie (dati di stazione) e le anomalie di temperatura a 850 hPa dei dati ERA-40 (ECMWF Re-Analysis) rende estremamente affidabili i risultati di quest'analisi, che non è particolarmente sensibile all'insieme di dati utilizzato, in entrambi i quali si possono individuare le ondate in modo analogo. L'analisi evidenzia come le ondate di calore siano mediamente più frequenti in Agosto (Tab. 3.1 e Fig. 3.2a) e una marcata tendenza positiva e statisticamente significativa (Tab. 3.1 e Fig. 3.2b) che ha portato a un triplicarsi della frequenza delle ondate di calore in 50 anni.

Tab. 3.1 – Distribuzione mensile e per decenni di HW nel periodo 1951-2000.

	Num giorni	Giorni (%)
Mese		
Giugno	152	30
Luglio	107	21
Agosto	187	36
Settembre	67	13
Decade		
1951-60	66	16
1961-70	38	9
1971-80	18	4
1981-90	98	24
1991-00	187	46

La dinamica delle ondate di calore dipende dalla posizione e intensità dei due rami della corrente a getto: il ramo "Scandinavo" e quello "Mediterraneo". Nel caso in cui i due rami siano quasi allineati, il ramo "Mediterraneo" ha un'intensificazione a nord delle Alpi, e a sud delle Alpi si forma in quota un'area a vorticità anticiclonica che favorisce la subsidenza e il riscaldamento adiabatico della troposfera sul Mediterraneo (Fig. 3.3), configurazione caratteristica dei periodi di caldo anomalo nel bacino e con una persistenza da 1 a 3 settimane. Quando il ramo "Mediterraneo" del getto si dispone lungo il nord Africa, la distanza dal ramo "Scandinavo" è relativamente grande, la vorticità sul bacino Mediterraneo ciclonica e la stagione "fresca".

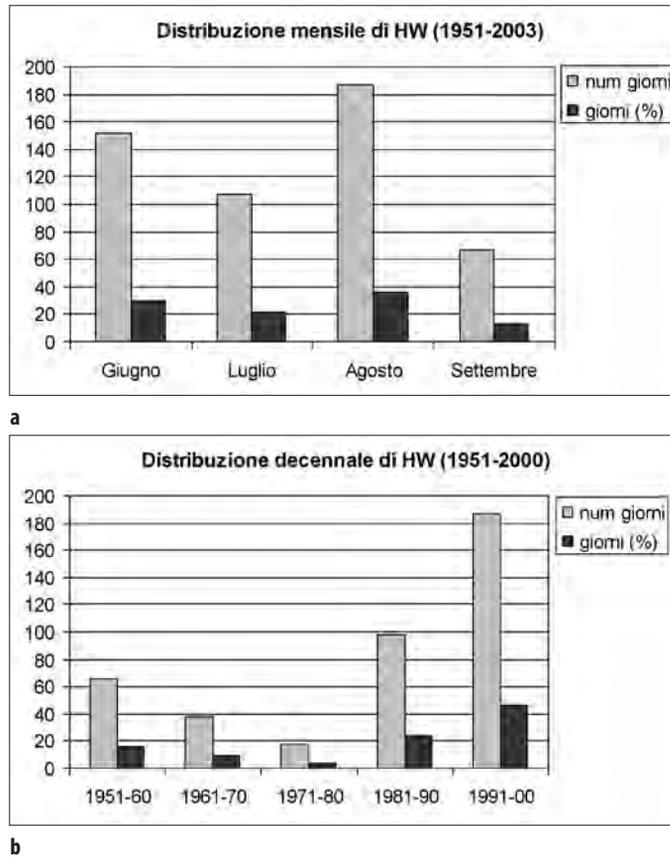


Fig. 3.2 – Distribuzione delle ondate di calore espressa in numero di giorni e percentuale di eventi nel periodo 1951-2003: a) distribuzione mensile, b) distribuzione per ciascun decennio.

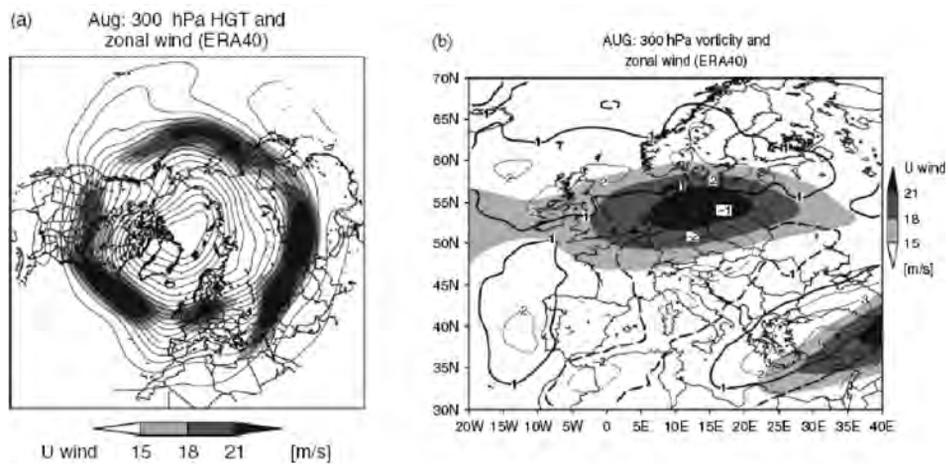


Fig. 3.3 – Giorni con ondate di calore nei mesi di Agosto nel decennio 1991-2000: valori medi di (a) Geopotenziale (isolinee) e vento zonale (aree grigie) a 300 hPa; (b) vorticità relativa (isolinee $1 \times 10^{-5} 1/s$) e vento zonale a 300 hPa (aree grigie).

3.2.3 Precipitazioni giornaliere

Le precipitazioni giornaliere possono raggiungere in Italia valori elevati. Lo studio dell'evoluzione di frequenza e intensità della precipitazione giornaliera è basato su un data-set costituito da 39 serie provenienti dalla banca dati dell'UCEA (Ufficio Centrale di Ecologia Agraria) relative al periodo 1880-2002, in cui il valore massimo è di 448 mm, registrato a Genova nel Gennaio 1977. Tale valore sicuramente non rappresenta un record: il 4 Novembre 1966 molte stazioni sulle Alpi orientali registrarono valori superiori ai 400 mm, con un record di 751 mm. La procedura di controllo ed omogeneizzazione, basata anche sulle informazioni raccolte sulla storia delle stazioni, ha costretto ad eliminare 6 delle 45 serie disponibili dal data-set, in quanto valutate altamente problematiche e quindi non omogeneizzabili (Brunetti et al., 2004).

Su tutto il territorio italiano è in corso una lieve diminuzione delle precipitazioni totali, una diminuzione significativa del numero dei giorni piovosi, un prevalente aumento dell'intensità delle precipitazioni con valori e livelli di significatività variabili a seconda della regione in esame (Brunetti et al., 2006). L'analisi statistica della distribuzione giornaliera della precipitazione (basata sulla PCA, Principal Component Analysis) suggerisce di suddividere l'Italia in cinque regioni (Fig. 3.4): Nord Ovest (NW); Nord-Est Nord (NEN); Nord-Est Sud (NES); Centro (CE); Sud (SO), con comportamento in parte differenziato, come mostrato in Fig. 3.5, per precipitazioni totali, numero di giorni piovosi e intensità delle precipitazioni.

L'analisi delle variazioni della distribuzione delle precipitazioni considera sei classi di intensità crescente definite sulla base dei percentili delle distribuzioni delle precipitazioni:

- C1: precipitazione inferiore al 50° percentile
- C2: precipitazione compresa tra il 50° e il 75° percentile
- C3: precipitazione compresa tra il 75° e il 90° percentile
- C4: precipitazione compresa tra il 90° e il 95° percentile
- C5: precipitazione compresa tra il 95° e il 99° percentile
- C6: precipitazione superiore al 99° percentile

In Fig. 3.6 sono indicati i risultati dell'analisi dei trend annuali della precipitazione totale nelle categorie C1, ..., C6. Si osserva una tendenza generale, nelle regioni settentrionali (NW, NEN e NES), ad una diminuzione del contributo relativo delle categorie "basse" (C1, C2 e C3) e un aumento di quello delle categorie corrispondenti agli eventi più intensi (C4, C5 e C6). Questo è particolarmente evidente nelle serie annuali delle aree NW e NES, dove quasi tutte le categorie presentano trend significativi (negativi per quelle di bassa intensità e positivi per quelle di alta intensità). Anche la regione CE presenta un comportamento simile a quello delle regioni settentrionali, nonostante la significatività dei trend sia più bassa. Al contrario, la regione SO non ha un andamento ben definito ed i trend sono raramente significativi.

La Fig. 3.7 presenta i trend annuali della frequenza degli eventi di ciascuna categoria ($fC1$, ..., $fC6$). Da un lato, è presente un trend negativo altamente significativo nel numero di eventi di bassa intensità ($fC1$, $fC2$ e $fC3$), che è evidente in tutte le regioni sia a livello annuale, sia nella maggior parte delle stagioni. Dall'altro lato è evidente un trend positivo del numero di eventi intensi ($fC4$, $fC5$ e $fC6$) in alcune regioni settentrionali (NEN e NES), mentre nelle regioni CE e SO tutte le categorie mostrano trend negativi, anche se non sempre statisticamente significativi.

In sintesi, tutto il territorio italiano è caratterizzato da una forte diminuzione del numero di eventi di bassa intensità e solo alcune regioni dell'Italia settentrionale mostrano un aumento della frequenza degli eventi di forte intensità. Ovvero, soprattutto nell'Italia peninsulare, l'aumento del contributo relativo alle precipitazioni totali dato dagli eventi più intensi è principalmente legato ad una diminuzione del numero di giorni con piogge deboli, mentre l'aumento dei giorni con piogge intense è meno evidente. In generale, la diminuzione degli eventi di bassa intensità e l'aumento degli eventi più intensi è il sintomo di una estremizzazione della distribuzione delle precipitazioni italiane.

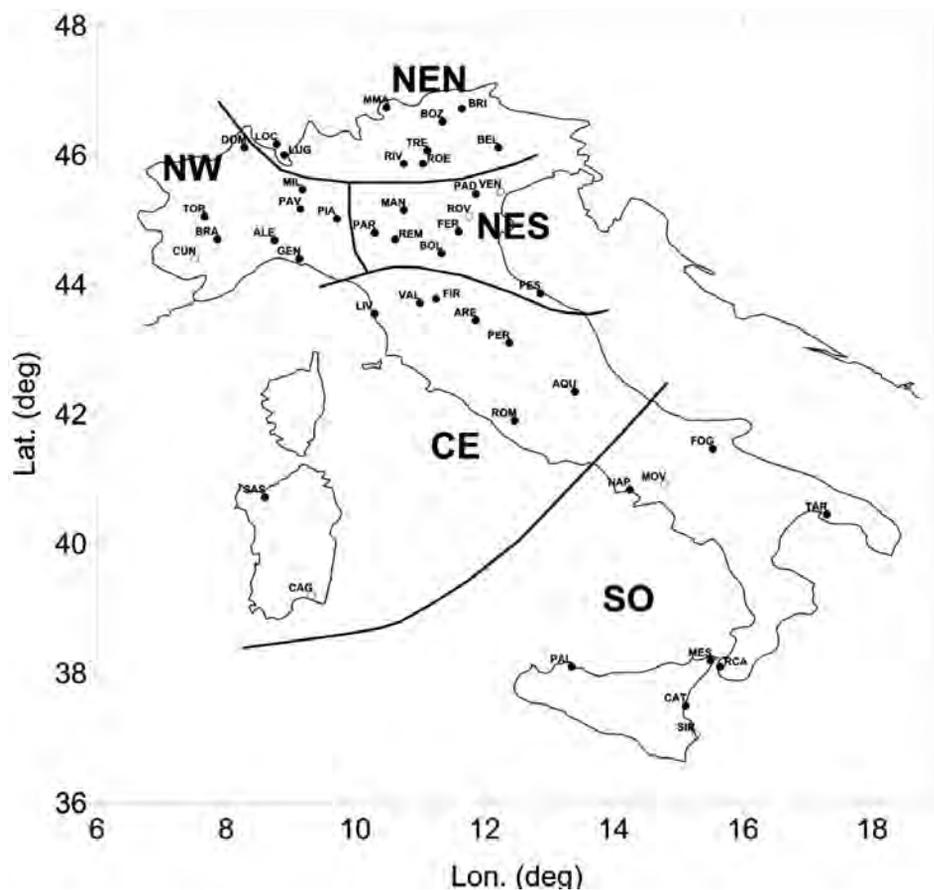


Fig. 3.4 – Regioni in cui si suddivide l'Italia in base alla PCA delle serie temporali delle precipitazioni giornaliere.

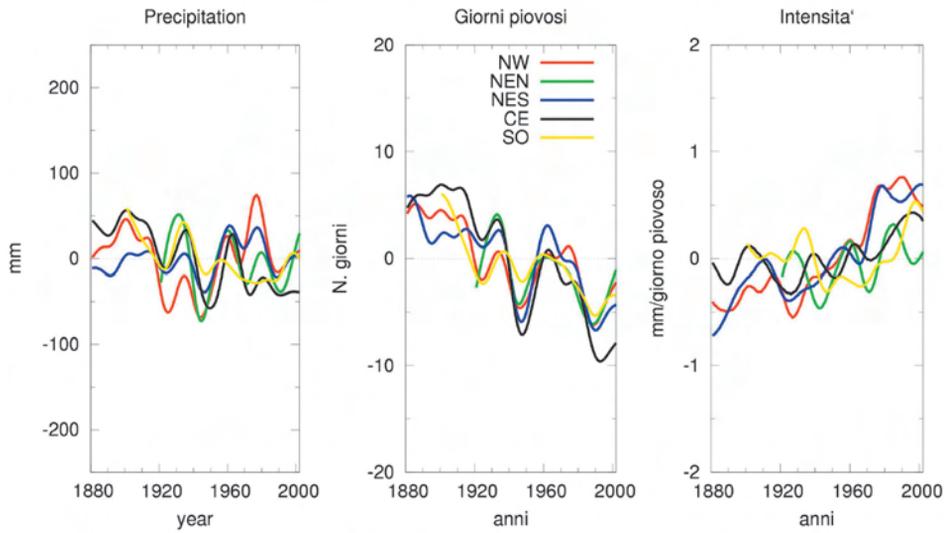


Fig. 3.5 – Serie annuali relative alle precipitazioni totali, al numero di giorni piovosi e all'intensità delle precipitazioni per le cinque regioni. Le serie sono rappresentate mediante un filtro gaussiano con deviazione standard pari a 5 anni.

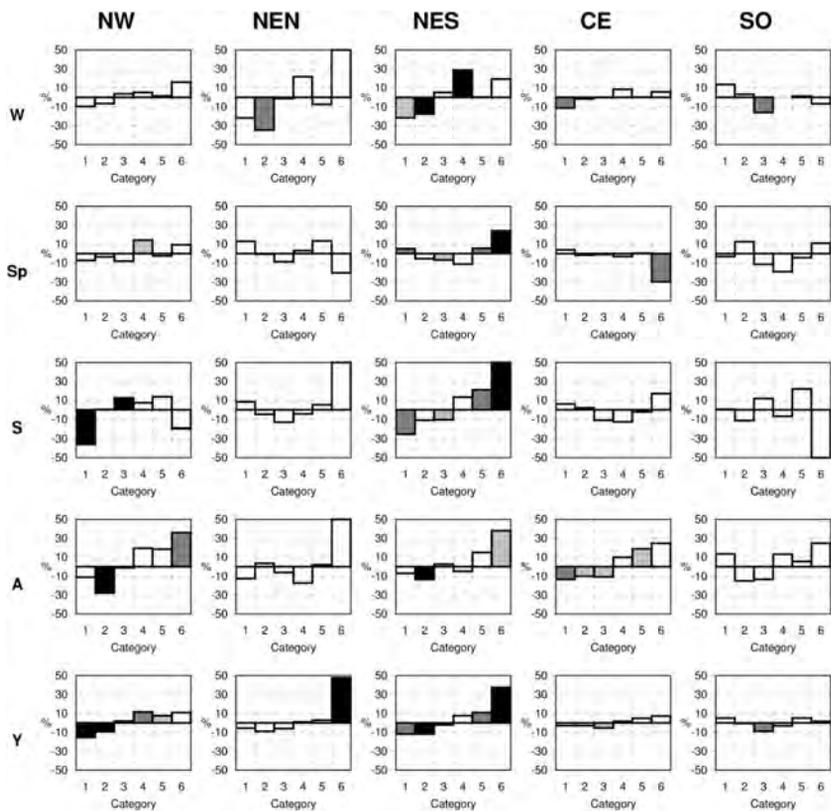


Fig. 3.6 – Trend (espressi come variazione percentuale relativa alla media del periodo 1961-1990) della precipitazione nelle categorie C1, ..., C6. (Nero = significatività > 99%; grigio = significatività > 95%; grigio-chiaro = significatività > 90%).

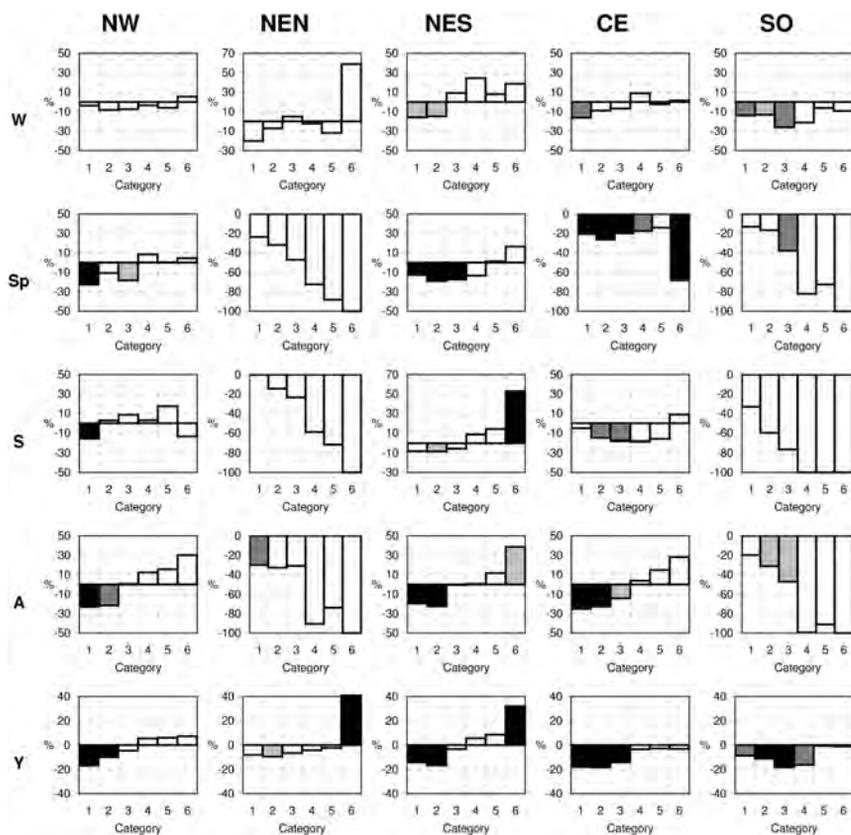


Fig. 3.7 – Trend (espressi come variazione percentuale relativa alla media del periodo 1961-1990) della frequenza degli eventi nelle sei categorie. (Nero = significatività > 99%; grigio = significatività > 95%; grigio-chiaro = significatività > 90%).

3.2.4 Eventi siccitosi

La definizione di siccità presenta varie possibilità anche in relazione alle finalità dello studio. In questo documento ci si limita ad aspetti strettamente meteorologici e un giorno è definito siccitoso quando la precipitazione è inferiore al 10% di quella media per quel giorno nel trentennio 1961-1990. Pertanto ogni giorno privo di precipitazione (o con poca precipitazione) viene classificato come siccitoso. Per evento siccitoso si definisce un periodo composto da una sequenza ininterrotta di giorni siccitosi. Il data-set dell'UCEA consente un'analisi delle tendenze delle siccità negli ultimi 120 anni. Sono in atto una crescita del numero di giorni siccitosi, in accordo con la decrescita del numero di giorni piovosi e, allo stesso tempo, una decrescita degli eventi siccitosi maggiore nelle regioni centro-meridionali.

Gli eventi siccitosi si possono suddividere in tre categorie sulla base della loro lunghezza: al di sotto del 50° percentile, tra il 50° e il 90°, e al di sopra del 90° percentile. La prima categoria (ovvero quelli di durata più breve) mostra un chiaro trend negativo,

altamente significativo per il nord-ovest e per il sud (con un trend di -6 eventi per secolo per entrambe le regioni), mentre gli eventi della terza categoria, ovvero quelli di maggior durata, presentano un generale aumento su tutto il territorio, anche se significativo solo al sud (con un trend di $+2$ eventi per secolo). Questo risultato, accanto all'aumento osservato nella lunghezza massima degli eventi siccitosi (Brunetti et al., 2002), spiega il contrastante andamento fra giorni ed eventi siccitosi: gli eventi siccitosi sono diminuiti in numero ma la loro lunghezza è mediamente aumentata.

L'analisi delle tendenze delle soglie dei percentili evidenzia tendenze che aumentano con il percentile considerato. La Fig. 3.8 mostra le tendenze delle soglie di un insieme di 21 percentili, dal primo al 99° ($1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ, 95^\circ$ e 99°), calcolate su una finestra temporale mobile di tre anni, considerando tutti i valori giornalieri (ovvero su sottocampioni di 1095 valori giornalieri) sugli ultimi 120 anni circa. È evidente, in particolare per il nord-ovest e per il sud, una tendenza verso periodi siccitosi di maggior durata.

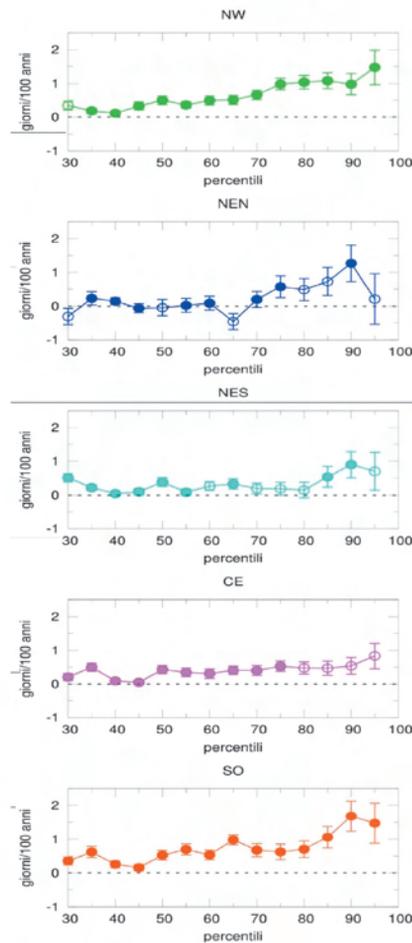


Fig. 3.8 – Trend delle soglie dei percentili della distribuzione della lunghezza degli eventi siccitosi. I cerchi pieni indicano valori significativi del trend ($> 90\%$), quelli vuoti indicano valori non significativi ($< 90\%$).

3.2.5 Cicloni, mareggiate e inondazioni costiere

In particolare nella stagione fredda l'Italia è frequentemente interessata da cicloni di notevole intensità. La fenomenologia dei cicloni che si formano e transitano nel Mediterraneo include categorie diversificate: cicloni di natura orografica che si formano a sud delle catene montuose che delimitano a settentrione il Mediterraneo, minime di origine termica particolarmente frequenti nelle aree continentali in estate, cicloni di origine africana che si formano a sud della catena dell'Atlante in particolare in primavera, sistemi di origine atlantica e minimi con un occhio centrale, che si formano sopra il mare in condizioni particolari e presentano parziali analogie con gli uragani tropicali (Lionello et al., 2006). I minimi dei cicloni possono raggiungere valori di pressione abbastanza bassi: il minimo più profondo in base ai dati ri-analisi ECMWF (1958-2002) si è verificato il 3 Dicembre 1976 nel Nord Adriatico con 968 hPa e valori intensi sono stati osservati transitare anche sull'Italia meridionale (un esempio è un minimo di 982 hPa presente il 15 Marzo 1962, tra Calabria e Sicilia), benché in genere siano più frequenti a occidente della penisola (un record di 975 hPa, l'1 Dicembre 1959, fra Pirenei e Golfo del Leone).

I cicloni esercitano una profonda influenza sull'ambiente ed in particolare sono spesso associati a eventi meteorologici con potenziali impatti negativi: precipitazioni intense e prolungate, onde marine, temporanei e marcati innalzamenti del livello del mare, venti con conseguenti piene, frane, inondazioni costiere, danni alle abitazioni e alle foreste. Lo studio dei cicloni necessita di set di dati che ricoprano tutta l'area e siano omogenei nello spazio e nel tempo. Tali dati sono forniti dalle cosiddette ri-analisi meteorologiche in cui la dinamica dei modelli meteorologici viene combinata con le osservazioni disponibili per ricostruire a scala globale la circolazione atmosferica. Attualmente sono disponibili le ri-analisi dell'ECMWF e di NCAR (Kalnay et al., 1996; Simmons and Gibson, 2000).

Studi specifici sulla frequenza di cicloni estremi sull'Italia non sono noti in letteratura. L'intera regione Mediterranea è stata analizzata (Trigo, 2005) come parte di uno studio sulla variabilità nella regione Euro-Atlantica, sulla base delle re-analisi ERA-40 ed NCEP/NCAR per il periodo 1958-2000 evidenziando la stagione Dicembre-Marzo. I risultati mostrano un generalizzato aumento di cicloni in una banda che si estende dal Labrador alla Scandinavia ed una banda caratterizzata da una complessiva diminuzione che si estende dalle Azzorre all'Europa centrale e al Mediterraneo. Questo suggerisce uno spostamento verso Nord della storm-track atlantica che corrisponde al prevalere della fase positiva della NAO (Oscillazione Nord Atlantica) nello stesso periodo (vedasi anche Lionello et al., 2006, per una recente sintesi su questo argomento).

Sul mare i cicloni determinano mareggiate, che si traducono sia in onde che in anomali innalzamenti del livello del mare lungo le coste.

L'innalzamento del livello del mare è particolarmente marcato nell'Adriatico settentrionale dove, noto come "Acqua alta", può determinare il temporaneo al-

lagamento di Venezia e di altre isole della Laguna Veneta. In generale, condizioni favorevoli alle inondazioni costiere nel Nord Adriatico sono associate a un'anomalia di pressione su scala mensile con un minimo nell'Atlantico settentrionale, a ridosso delle coste europee (Lionello, 2003). Gli episodi sono innescati dal passaggio di cicloni sull'Europa centrale o a sud delle Alpi (Lionello, 2003). Intensità e frequenza degli eventi possono essere studiate sulla base dei dati mareografici registrati con frequenza oraria nel centro della città. Il valore massimo è stato raggiunto il 4 Novembre 1966, con un contributo meteorologico di circa 160 cm, cui corrisponde un tempo di ritorno di circa 250 anni. L'aumento della frequenza degli episodi di acqua alta nella seconda metà del XX secolo (Canestrelli et al., 2001) è evidente, ma l'analisi dei dati mareografici per il periodo 1940-2000 mostra che l'aumento dei valori estremi è, comunque, dovuto a un aumento del livello relativo del mare e non a una maggiore intensità degli eventi meteorologici che li causano (Lionello, 2003). Infatti a partire dal 1940 (Fig. 3.9) si osservano fluttuazioni interdecadali del contributo meteorologico ai livelli estremi (cioè la parte dell'aumento di livello dovuto alla sola componente meteorologica), ma nessuna marcata tendenza se si considerano le bande di incertezza associate alle stime dei valori estremi.

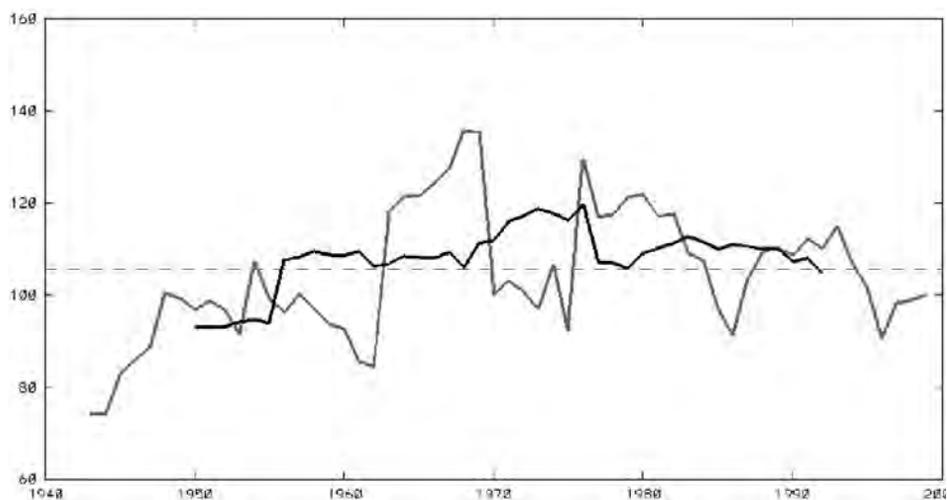


Fig. 3.9 – Livello del mare a Venezia durante una mareggiata: Il grafico mostra il valore corrispondente a un tempo di ritorno pari a 10 anni, cioè superato mediamente una volta ogni 10 anni. La linea tratteggiata orizzontale mostra il valore calcolato sulla base dell'intero periodo 1940-2001. Le linee continue grigia e nera mostrano i valori basati sugli eventi interni a una finestra mobile di ampiezza 7 e 21 anni, rispettivamente.

Nei mari attorno alle coste Italiane, in particolare nei bacini occidentali, non sono rare tempeste di notevole intensità. Il valore massimo (a partire dal 1989, data di entrata in servizio della maggior parte degli ondometri della RON, Rete Ondametrica Nazionale) di altezza d'onda significativa è stato registrato ad Alghero (9,88 m); seguono Cetraro (8,9 m), Ponza (7,9 m), La Spezia (6,3 m). Il valore

massimo registrato fra Ionio e Adriatico è stato rilevato a Ortona con 6,2 m. I cicloni responsabili di valori elevati di altezza d'onda sono caratterizzati da minimi posizionati sull'Italia o in prossimità delle coste Italiane (Lionello et al., 2006). Le tendenze delle altezze delle onde marine sono note solo in modo approssimativo. Le misure ondometriche sono disponibili in poche posizioni e solo a partire dalla fine degli anni '80. Le misure satellitari solo dall'inizio degli anni '90. Entrambe queste fonti di dati forniscono serie temporali troppo brevi per determinare tendenze climatiche su scale multidecadali. Le stime sono pertanto necessariamente basate su simulazioni numeriche, caratterizzate purtroppo da risultati non sempre accurati. Mentre per i valori medi mensili i trend climatici sono stati valutati in modo soddisfacente ed è stata individuata una diminuzione durante i mesi invernali (Lionello e Sanna, 2005) associata alla tendenza positiva della Oscillazione Nord Atlantica (NAO), per i massimi annuali vi sono indicazioni di una significativa riduzione nel Mar Ionio, mentre altre variazioni non sono sufficientemente accentuate per raggiungere la significatività statistica (Fig. 3.10; Lionello et al., 2006), benché vi sia un accenno di un aumento nel Mediterraneo nord-occidentale. Quest'ultimo è coerente coi dati rilevati dalle Boe RON (Rete Ondometrica Nazionale) nel golfo Ligure, nel Tirreno e alle coste occidentali della Sardegna durante l'ultima decade del XX secolo, che tuttavia non sono sufficienti da soli a stabilire una tendenza climatica.

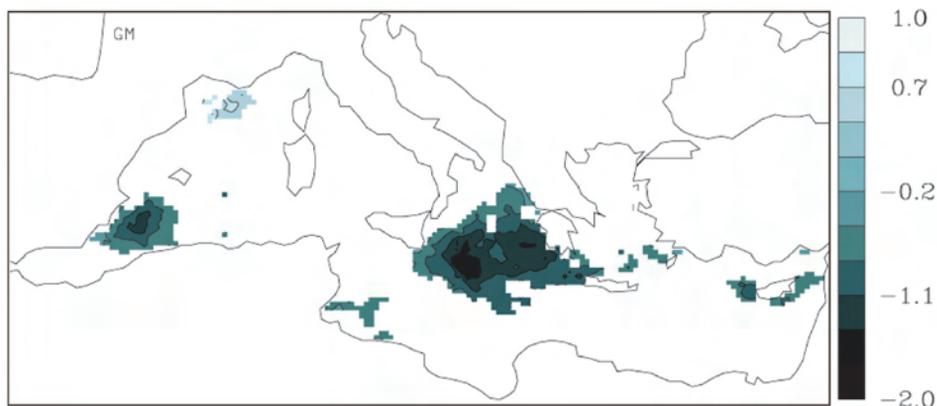


Fig. 3.10 – Variazioni statisticamente significative dei massimi annuali in 50 anni, valutate sulla base di un trend lineare stimato per il periodo 1958-2001 utilizzando simulazioni numeriche e i dati della ri-analisi ERA-40.

3.3 ESTREMI E CAMBIAMENTI CLIMATICI

Le analisi dei possibili cambiamenti climatici sono basate su quattro principali scenari, cioè possibili tipologie di futuro sviluppo socio-economico cui sono associati livelli di emissione di gas serra e aerosol. Tutti gli scenari, convenzionalmente denotati A1, A2, B1, B2, descrivono una futura situazione in cui il livello globale di prosperità è maggiore di quello attuale, ma seguono modelli di sviluppo diffe-

renti, che assegnano priorità al rapido sviluppo economico o alla tutela ambientale, che prevedono diversi tassi di crescita della popolazione globale, includendo fattori di sviluppo socio-economico e politiche di tutela ambientale. Le sigle si riferiscono alle caratteristiche fondamentali degli scenari, con priorità per lo sviluppo economico (A) o la tutela ambientale (B) e strategie orientate verso sinergie globali (1) o soluzioni regionali (2). Ogni scenario rappresenta una semplificazione della realtà e si suddivide ulteriormente in varie linee. L'idea è analizzare molteplici plausibili livelli di emissione, sia in termini di quantitativi totali, che in termini di composizione.

Gli strumenti fondamentali usati per realizzare proiezioni climatiche a partire da scenari di emissione sono i modelli accoppiati di circolazione generale atmosfera-oceano (o AOGCM) e i modelli globali della sola circolazione atmosferica (AGCM). La regione mediterranea è un tipico esempio di come le marcate variazioni a piccola scala delle caratteristiche geomorfologiche producono effetti che non possono essere riprodotti da modelli globali, i quali, nonostante i progressi raggiunti negli anni più recenti, hanno risoluzioni che non superano i 100-300 km, a parte pochissime eccezioni con risoluzioni superiori. Per ottenere risultati che includano gli effetti locali sono state sviluppate diverse tecniche di "regionalizzazione" (Giorgi et al., in IPCC 2001), che si possono dividere in tecniche di tipo dinamico e di tipo statistico. Le prime consistono nell'utilizzo dei modelli ad area limitata, o "Regional Climate Model" (RegCM), le seconde in tecniche complementari, che sfruttano le relazioni statistiche fra le variabili a grande scala e quelle locali.

Per la valutazione degli estremi, il trasferimento del segnale dalla scala globale a quella regionale è un aspetto importante, perché gli estremi spesso non sono simulati adeguatamente dai modelli globali. In generale in questo processo, con il restringersi della regione considerata e al diminuire della probabilità dell'evento (che è in genere associato ad un aumento della sua intensità) l'affidabilità dei risultati diminuisce. L'analisi delle variazioni dell'intensità degli estremi si inserisce, quindi, nella fase finale di una "catena" di modelli in cui i livelli di emissione si traducono in scenari climatici ad alta risoluzione, di cui vengono analizzate le variabili focalizzandosi sulla distribuzione statistica delle stesse, e in particolare sulle caratteristiche dei valori che risultano poco frequenti. Questo complesso processo implica imprecisioni che devono essere valutate nell'analizzare i risultati delle proiezioni climatiche.

3.3.1 Temperatura: valori minimi e massimi

Le proiezioni degli estremi di temperatura per il periodo 2070-2100, attuate dai progetti PRUDENCE e STARDEX mediante simulazioni a scala regionale sull'Europa, evidenziano per le temperature massime un aumento particolarmente intenso durante l'estate che raggiunge 6-7 °C nella penisola Iberica,

Francia, Europa centro-meridionale e sud-orientale. In inverno, primavera e autunno l'aumento è inferiore, con un massimo di circa 4 °C, esteso in autunno a quasi tutta l'Europa, mentre in primavera è limitato al nord-est Europa. Anche per le temperature minime l'incremento è maggiore nella stagione estiva, quando raggiunge i 6 °C nella parte centrale della penisola Iberica e in un settore molto limitato dell'Europa sud-orientale, che in quella invernale, in cui l'aumento maggiore ha luogo nell'Est, Nord-Est Europa, con valori attorno a 5 °C. In generale l'aumento della temperatura media determina da un lato una diminuzione del numero di giorni di gelo, che arrivano a ridursi di 60-120 giorni all'anno nell'Europa del Nord per il periodo 2070-2100, dall'altro un incremento significativo delle ondate di calore, la cui durata complessiva aumenta da qualche settimana, in Gran Bretagna e Scandinavia, fino a 120 giorni, nell'Europa del sud (Beniston et al., 2005). Analisi a scale inferiori possono essere svolte mediante tecniche di regionalizzazione con modelli statistici. Per il territorio italiano, nella letteratura scientifica, è presente solo l'analisi della regione Emilia-Romagna, dove gli scenari per il periodo 2070-2100 sono stati ottenuti mediante un modello statistico di regressione multivariata, basato sull'analisi della correlazione canonica (CCA, Canonical Correlation Analysis) tra i risultati del modello di globale HadAM3P, sviluppato dall'Hadley Centre for Climate Prediction (UK), e indicatori stagionali calcolati per 30 stazioni meteorologiche distribuite uniformemente sulla regione. I risultati mostrano aumenti significativi in tutte le stagioni, sia per la temperatura minima che per la massima. L'incremento medio della temperatura massima sulla regione raggiunge i 5 °C nella stagione estiva, 3 °C in primavera e 2 °C nelle altre stagioni (Tomozeiu et al., 2007). I cambiamenti delle temperature massime sono mostrati nel pannello superiore di Fig. 3.11. L'aumento delle temperature minime (Fig. 3.11, pannello inferiore) è più intenso durante l'estate e l'autunno, con valori fino a 4 °C, seguito da quello in inverno, con aumenti fino a 3 °C. In primavera l'aumento è meno intenso.

Al cambiamento dei valori medi di minimi e massimi di temperatura giornalieri corrispondono cambiamenti della loro distribuzione statistica. Il 10° percentile della temperatura minima aumenta in tutte le stagioni, con un valore di circa 4 °C per l'inverno, di 2 °C per la primavera e l'estate e di 1 °C per l'autunno. Il 90° percentile della temperatura massima aumenta di valori compresi tra 1 °C per l'inverno e la primavera e 4 °C per la stagione estiva. Conseguenze di queste variazioni sono una diminuzione del numero dei giorni di gelo durante l'inverno (fino a 40 giorni) e un aumento della durata delle ondate di calore in primavera e in estate (Cacciamani et al., 2005; 2007; Tomozeiu et al., 2007).

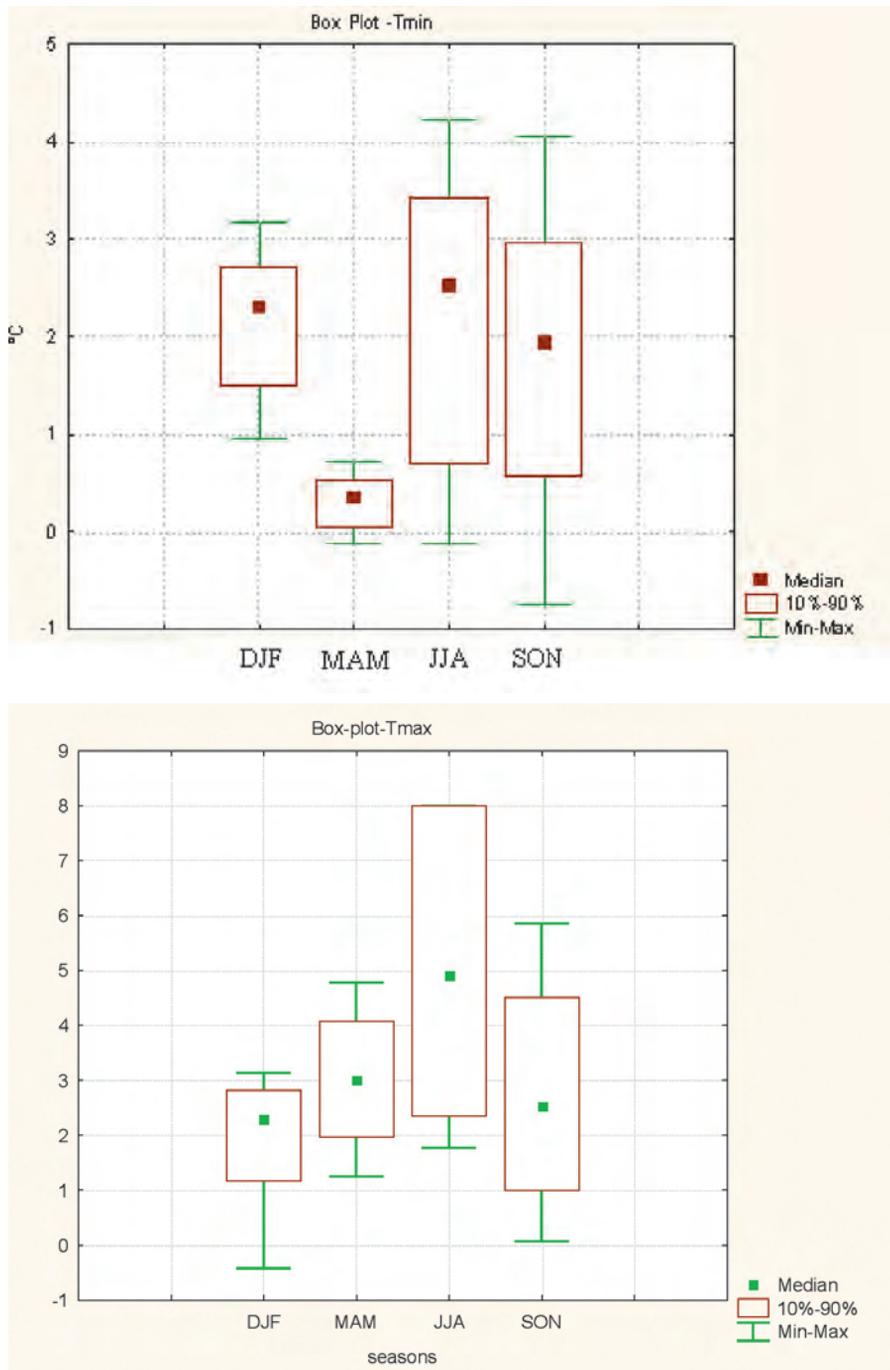


Fig. 3.11 – Scenari di cambiamento delle temperature in Emilia-Romagna e per le varie stagioni. Lo scenario è rappresentato come la differenza tra il clima futuro (media anni 2070-2100) e il clima del trentennio 1961-1990. Pannello superiore: temperature massime. Pannello inferiore: temperature minime. I diagrammi evidenziano i valori medi degli aumenti (il quadratino verde rappresenta la mediana) e la dispersione dei valori massimi giornalieri.

3.3.2 Valori medi ed estremi di precipitazione

La valutazione dei cambiamenti degli estremi della precipitazione è molto incerta: i risultati dei vari modelli mostrano cambiamenti meno evidenti, non sempre in concordanza e quindi di più difficile interpretazione. In generale, la precipitazione è una variabile il cui comportamento dipende da molti fattori e presenta un'intrinseca ed elevata variabilità spazio-temporale. Le procedure di regionalizzazione sono molto più critiche per la precipitazione che per la temperatura in particolare a scala regionale (es. Lucarini et al., 2007). Gli scenari di precipitazione, sia quelli dedotti direttamente da modelli globali (Giorgi e Lionello, 2007) che quelli ottenuti mediante procedure di regionalizzazione (all'interno del progetto PRUDENCE) evidenziano per il periodo 2070-2100, rispetto al periodo 1961-1990, un generale incremento delle precipitazioni nell'Europa settentrionale durante l'inverno, e una generale diminuzione nell'Europa centrale ed in particolare del sud (area Mediterranea), durante la stagione estiva (Räisänen et al., 2004).

Un segnale abbastanza chiaro che si evidenzia dalle simulazioni dei RegCM è presente nell'intensità di precipitazioni e nel numero di giorni con precipitazioni, dove per giorno con precipitazione si intende il giorno in cui piove più di 1 mm. Durante l'inverno le proiezioni mostrano un aumento dell'intensità e del numero di giorni con precipitazioni in: Francia, Gran Bretagna, Europa Centrale, Europa dell'est e nord-est. Gli scenari per la stagione estiva mostrano invece una diminuzione del numero di giorni con precipitazioni in tutta Europa ma un aumento dell'intensità delle precipitazioni nel centro, est e nord-est dell'Europa. Per quanto riguarda la primavera e l'autunno gli scenari rilevano ancora una diminuzione del numero di giorni con precipitazioni (circa 10%), ma un aumento (attorno al 10%) dell'intensità delle precipitazioni, in quasi tutta l'Europa (Giorgi et al., 2004).

Le stesse simulazioni prevedono per l'area Alpina un aumento del numero di giorni con precipitazione durante l'inverno (circa 10%) e una diminuzione nelle altre stagioni, più marcata nella stagione estiva fino al 25%. Sempre per la zona Alpina l'intensità di precipitazioni tenderà ad aumentare durante inverno, primavera ed autunno (fino a 10%), con un debole segnale d'aumento in estate. Per quanto riguarda il resto dell'Italia le simulazioni prevedono una diminuzione del numero di giorni con precipitazioni in tutte le stagioni, un segnale debole durante l'inverno mentre per le altre stagioni si può arrivare ad una diminuzione anche del 15%. Gli scenari dell'intensità delle precipitazioni prevedono un aumento in autunno (15%), primavera (circa 10%), un debole segnale in inverno, mentre durante l'estate non è previsto un segnale chiaro di cambiamento. Non sono ancora state realizzate procedure di regionalizzazione finalizzate al calcolo delle variazioni degli estremi sul territorio italiano.

3.3.3 Cicloni, onde e inondazioni costiere

Le simulazioni a scala regionale degli scenari A2 e B2 (anni 2071-2100) effettuate col modello RegCM sono state utilizzate anche per un'analisi dell'attività ciclonica, di onde e inondazioni costiere (Lionello et al., 2007). La simulazione copre in effetti l'intera regione Europea e ha evidenziato come in generale il cambiamento climatico prospettato sia maggiore nel Nord Europa dove si verifica un'intensificazione dell'attività ciclonica nella stagione invernale e una sua attenuazione in quella estiva. Il segnale è debole nella regione mediterranea, dove c'è una tendenza generale alla riduzione in autunno e primavera e alla diminuzione dell'intensità dei cicloni estremi in Aprile e Agosto, ma un suo aumento in Marzo.

L'analisi di onde marine e inondazioni costiere richiede l'utilizzo di modelli supplementari, che a partire dai campi di vento calcolino lo spettro delle onde marine e a partire da vento e pressione calcolino il livello del mare. Tali modelli sono ben noti e collaudati in letteratura, pertanto il loro utilizzo non contribuisce significativamente all'incertezza degli scenari, che resta sostanzialmente legata a quella delle forzanti meteorologiche.

L'analisi dei campi di onde marine (Lionello et al., 2007) mostra come i cambiamenti della circolazione atmosferica e dei venti alla superficie del mare concorrano a ridurre l'intensità di future mareggiate alle coste italiane con una diminuzione sia dei valori medi che degli estremi. I cambiamenti sono simili nello scenario A2 (Fig. 3.12) e in B2, ma hanno in quest'ultimo minore ampiezza.

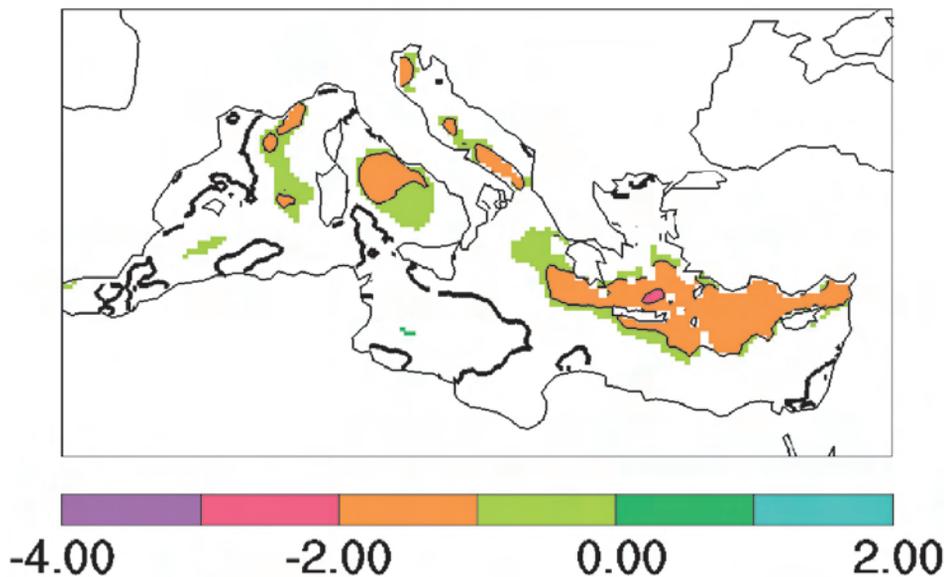


Fig. 3.12 – Variazioni dei valori corrispondenti a un tempo di ritorno di 10 anni, dell'altezza significativa delle onde nel Mediterraneo. Le aree colorate indicano una diminuzione significativa al 90% nello scenario A2 rispetto al clima presente con un valore in genere inferiore a 2 m.

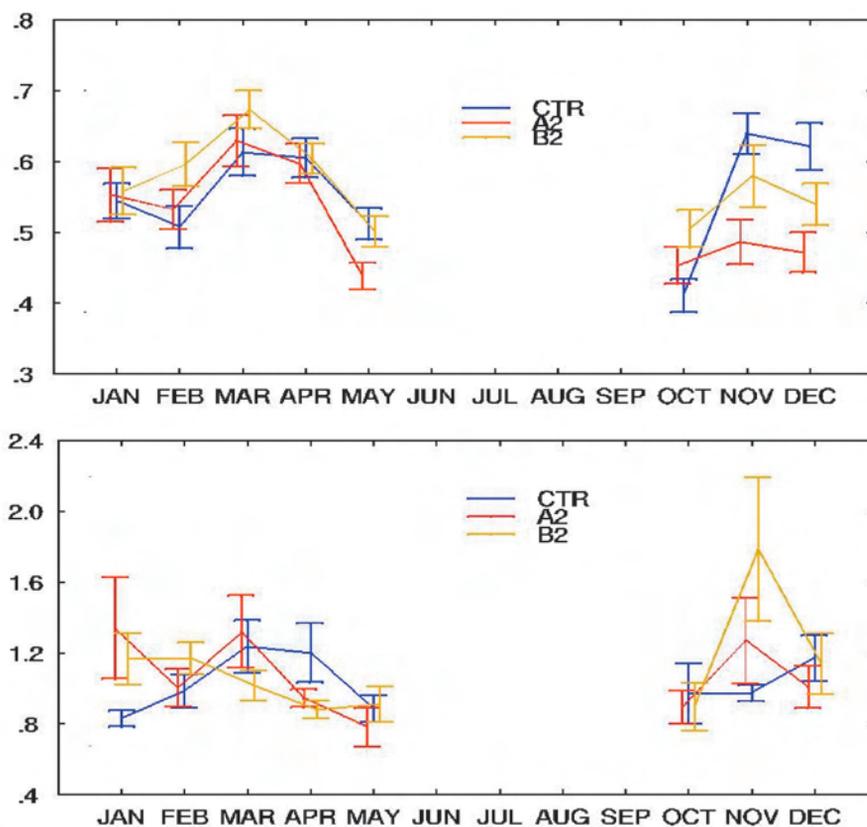


Fig. 3.13 – Ciclo annuale dei valori massimi corrispondenti a tempi di ritorno pari a 2 anni (pannello superiore) e 100 anni (pannello inferiore). L'analisi non è stata effettuata per i mesi estivi.

Un'analisi simile è stata effettuata per i valori massimi del livello del mare nel Nord Adriatico. Il pannello superiore di Fig. 3.13 mostra in funzione dei mesi dell'anno i cambiamenti di valori corrispondenti a eventi ancora relativamente frequenti, cioè attesi in media una volta ogni due anni. Il pannello inferiore di Fig. 3.13 quelli di eventi estremamente rari, cioè attesi in media una volta ogni 100 anni. La curva denotata con "CTR" rappresenta il clima attuale. I mesi estivi sono esclusi dallo studio. I risultati mostrano una diminuzione dell'intensità durante l'autunno degli eventi con tempo di ritorno pari a due anni e un aumento in Novembre e Gennaio dei valori con tempi di ritorno pari a 100 anni. Sorprendentemente, lo scenario B2 presenta valori maggiori di A2, particolare che richiede ulteriori indagini in riferimento al ruolo della variabilità interdecadale in questi risultati. Questa valutazione deve essere integrata da una valutazione della futura possibile evoluzione del livello medio del mare (inclusa la componente di subsidenza) che si è rivelato il fattore determinante nell'aumento della frequenza delle inondazioni osservata nella seconda metà del XX secolo. L'IPCC Fourth Assessment Report contiene delle stime dell'aumento del

livello medio globale che non è possibile trasferire a scala locale senza tenere conto delle variazioni locali di temperatura, salinità e correnti e il loro effetto sulla distribuzione e volume del fluido. Alcuni recenti risultati indicano nel Nord Adriatico una componente locale di difficile valutazione in quanto determinata da effetti contrastanti di espansione, dovuto all'aumento della temperatura, e contrazione, dovuto a quello della salinità (Tsimplis et al., 2007).

3.4 DISCUSSIONE

L'analisi dei dati attualmente disponibili mostra che sono in corso apprezzabili variazioni in alcuni tipologie di eventi estremi, in particolare in riferimento al ciclo idrologico, che hanno rilevanti ricadute sul territorio italiano. Precisamente si osservano un aumento delle temperature massime e minime giornaliere che riflette quello della temperatura media, un conseguente aumento delle ondate di calore, una diminuzione del numero di giorni piovosi con un aumento del contributo percentuale alle precipitazioni totali dovuto alle categorie più intense (con un cambiamento di forma della distribuzione statistica delle precipitazioni), una diminuzione del numero degli eventi siccitosi e un aumento della loro lunghezza media.

Altri aspetti, legati all'intensità delle mareggiate e dei cicloni mostrano variazioni interdecadali (evidenti nell'analisi del contributo meteorologico ai valori estremi dell'acqua alta a Venezia), e tendenze deboli o non ancora rilevate con sufficiente affidabilità. Le informazioni suggeriscono comunque una diminuzione dell'altezza delle onde estreme nel Mediterraneo centrale, e un loro possibile modesto aumento nel Mediterraneo nord-occidentale.

Per scenari climatici futuri, i dati attualmente disponibili mostrano per il periodo 2070-2100 un generale aumento della temperatura, sia nei valori minimi, con una conseguente diminuzione del numero di giorni di gelo, sia nei valori massimi, che comporteranno un incremento della durata delle ondate di calore. Le proiezioni climatiche indicano un generalizzato aumento dell'intensità dei singoli eventi di precipitazione, in particolare nella zona alpina, ma anche nelle altre regioni italiane in autunno e primavera. L'assenza di studi specifici sulle precipitazioni estreme non consente comunque di valutarne variazioni future di intensità.

L'analisi di future mareggiate suggerisce una diminuzione delle onde estreme e un comportamento più complesso per l'inondazione nell'Adriatico settentrionale, con una diminuzione del livello degli eventi intensi e un possibile aumento di quello degli eventi eccezionali.

La presente sintesi evidenzia importanti carenze conoscitive. In generale, come l'identificazione di tendenze e futuri cambiamenti negli estremi climatici sia ancora incompleta. Variabili le cui tendenze sono note con sufficienza sono la precipitazione (a partire dal 1880), la temperatura (a partire dal 1951) e il livello del mare (analizzato a partire dal 1940). Il comportamento degli estremi in periodi anteriori e per altre variabili non è fino ad ora noto. Un esempio di analisi importante per cui occorre

raccogliere informazioni è la frequenza e intensità delle ondate di calore nel secolo XIX e fino al 1950. La determinazione del comportamento degli estremi in scenari climatici futuri è inoltre incerta (con la sola eccezione della temperatura) se non addirittura ignota (precipitazioni intense). In generale i modelli presentano importanti limiti nella loro capacità di rappresentare estremi climatici e accurate verifiche della loro affidabilità continuano a essere necessarie. Il problema è particolarmente urgente per gli estremi del ciclo idrologico, sia per gli aspetti paventati di intensificazione di eventi intensi che per la maggior lunghezza e frequenza di periodi siccitosi. Purtroppo, molte delle quantità analizzate in questo capitolo non sono a rigore rappresentative del comportamento degli estremi, ma loro sostitutivi, intesi a fornire utili indicazioni, in assenza di informazioni più precise. Per colmare tali lacune sono importanti numerosi obiettivi: ottenere una ricostruzione accurata di estremi di cicloni e onde marine per la seconda metà del XX secolo, nuovi studi che integrino per altre regioni quelli già svolti per l'Emilia Romagna su futuri scenari climatici, la disponibilità di molteplici simulazioni a scala regionale per l'analisi di futuri estremi climatici, e in particolare, per cicloni, onde e inondazioni costiere. Nonostante nuovi risultati siano attesi da progetti internazionali (ENSEMBLES e CIRCE) e attività di ricerca a livello nazionale attualmente in corso, queste problematiche necessitano di ulteriori iniziative e investimenti per essere affrontate in modo esauriente.

BIBLIOGRAFIA

- Baldi, M., Dalu, G., Maracchi, G., Pasqui, M., Cesarone, F., 2006: Heat waves in the Mediterranean: a local feature or a larger-scale effect? *Int. J. Climatol.*, 26, 1477-1487.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylha, K., Koffi, B., Palutikof, J., Scholl, R., Semmler, T., Woth, K., 2005: Future Extreme Events in European Climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, PRUDENCE special issue (submitted).
- Brunetti, M., Maugeri, M., Navarra, A., Nanni, T., 2002: Droughts and extreme events in regional daily Italian precipitation series. *Int. J. Climatol.*, 22, 543-558.
- 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.*, 109, D05102, doi: 10.1029/2003JD004296.
- Brunetti, M., Maugeri, M., Monti, F., Nanni, T., 2006: Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *Int. J. Climatol.*, 26, 345-381.
- Cacciamani, C., Tomozeiu, R., Pavan, V., Morgillo, A., Marchesi, S., 2005: Eventi estremi in Emilia-Romagna, il progetto europeo STARDEX. *ARPA Rivista*, 6, Novembre-Dicembre 2005.
- Cacciamani, C., Tomozeiu, R., Pavan, V., Tibaldi, S., 2007: Dal globale al locale. *ARPA Rivista*, 1, Gennaio-Febbraio 2007, 19-21.

- Canestrelli, P., Mandich, M., Pirazzoli, P.A., Tomasin, A., 2001: Wind, depression and seiches: tidal perturbations in Venice (1951-2000), *Città di Venezia, Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Comune di Venezia*, 1-104.
- Colacino, M., Conte, M., 1995: Heat waves in the Central Mediterranean. *A Synoptic climatology. Il Nuovo Cimento*, 18 C, 295-304.
- ETCCDI: CCI/CLIVAR/JCOMM Expert Team (ET) on Climate Change Detection and Indices. <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/>.
- Giorgi, F., Bi, X., Pal, J.S., 2004: Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II. Climate change scenarios (2071-2100). *Climate Dynamics*, 23, 839-858, doi: 10.1007/S00382-004-0467-0.
- Giorgi, F., Lionello, P., 2007: Climate Change Projections for the Mediterranean Region. *Global and Planetary Change*, doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D., 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Klein Tank, A.M.G., Konnen, G.P., 2003: Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. *Journal of Climate*, 16, 3665-3680.
- Kostopoulou, E., Jones, P.D., 2005: Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean. *Meteorology and atmospheric physics*, 89, 69-85.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson C.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Lionello, P., 2005: Extreme surges in the Gulf of Venice. *Present and Future Climate*. In: Fletcher, C., Spencer, T. (eds): *Venice and its lagoon, State of Knowledge*. Cambridge University Press, Cambridge UK, 59-65.
- Lionello, P., Sanna, A., 2005: Mediterranean wave climate variability and its links with NAO and Indian Monsoon. *Climate Dynamics*, 25, 611-623.
- Lionello, P., Bhend, J., Buzzi, A., Della-Marta, P.M., Krichak, S., Jansà, A., Maheras, P., Sanna, A., Trigo, I.F., Trigo, R., 2006: Cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment. In: Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R. (eds): *Mediterranean Climate Variability*.: Elsevier (Netherlands), Amsterdam, 324-272.
- Lionello, P., Cogo, S., Galati, M.B., Sanna, A., 2007: The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. *Global and Planetary Change*, doi: 10.1016/j.gloplacha.2008.03.004.
- Lionello, P., Boldrin, U., Giorgi, F., 2007: Future changes in cyclone climatology over Europe as inferred from a regional climate simulation. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-007-0315-0.

- Lucarini, V., Danihlik, R., Kriegerova, I., Speranza, A.: Does the Danube exist? Versions of reality given by various regional climate models and climatological datasets. *J. Geophys. Res.*, 112, D13103 (2007), doi: 10.1029/2006JD008360.
- Maheras, P., Xoplaki, E., Davies, T.D., Martin-Vide, J., Barriendos, M., Alcoforado, M.J., 1999: Warm and cold monthly anomalies across the Mediterranean basin and their relationship with circulation; 1860-1990. *Int. J. Climatol.*, 19, 1697-1715.
- MICE, 2005: Modelling the Impact of Climate Extremes, coord. J. Palutikof. http://www.cru.uea.ac.uk/projects/mice/FINAL_VERSION_MICE_REPORT.pdf.
- Ogi, M., Tachibana, Y., Yamazaki, K., 2003: Impact of the wintertime North Atlantic Oscillation (NAO) on the summertime atmospheric circulation. *Geophysical Research Letters*, 30, L01704, doi: 10.1029/2003GL017280.
- Ogi, M., Yamazaki, K., Tachibana, Y., 2005: The summer northern annular mode and the abnormal summer weather in 2003. *Geophysical Research Letters*, 32, L04706, doi: 10.1029/2004GL021528.
- PRUDENCE: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeaN ClimatE change, coord. J.H. Christensen. <http://prudence.dmi.dk/>.
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Döscher, R., Graham, L.P., Jones, C., Meier, H.E.M., Samuelsson, P., Willen, U. (2004) European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. *Climate Dynamics* 22: 13-31
- Simmons, A.J., Gibson, J.K., 2000: The ERA-40 Project Plan. ERA-40 Project Report Series n. 1.
- STARDEX, 2005: STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions, EVK2-CT-2001-00115, coord. C. Goodess. http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/reports/STARDEX_MR7_2005_section_6.pdf.
- Tomozeiu, R., Cacciamani, C., Pavan, V., Morgillo, A., Busuioc, A., 2007: Climate change scenarios for surface temperature in Emilia-Romagna (Italy) obtained using statistical downscaling models. *Theor. Appl. Climatol.*, 90, 25-47, doi: 10.1007/s00704-006-0275-z.
- Trigo, I.F., 2005: Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-005-0065-9.
- Tsimplis, M.N., Marcos, M., Somot, S., 2007: 21st century Mediterranean sea level rise: Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model. *Global and Planetary Change*, 63, 105-111.
- Von Storch, H., Zorita, E., Cubasch, U., 1993: Downscaling of climate change estimates to regional scales: An application to the Iberian winter time. *Journal of Climate*, 6, 1161-1171.