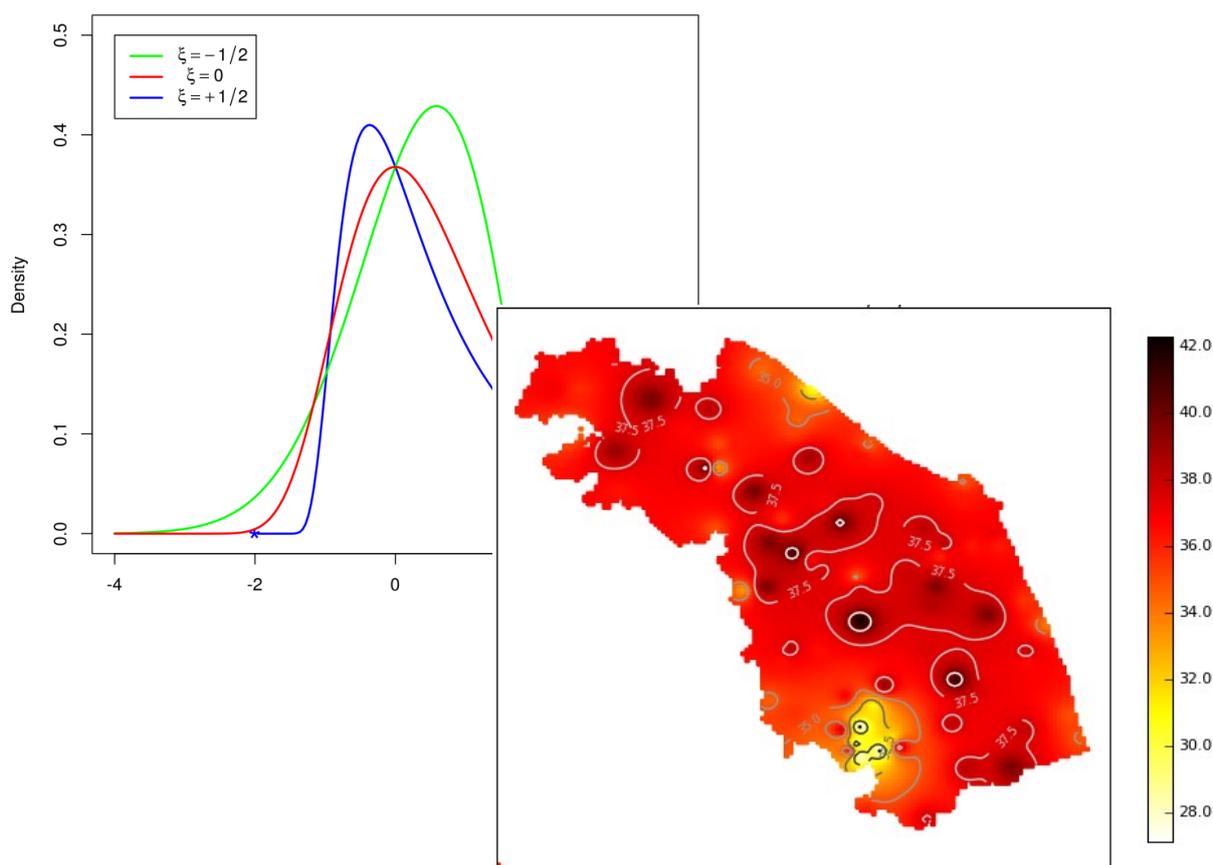




ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI TEMPERATURA ED ONDATE DI CALORE NEL TERRITORIO DELLA REGIONE MARCHE





REGIONE MARCHE
Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale



a cura del **Centro Funzionale Regionale**

responsabile: dott. geol. Paolo Sandroni

Redattori:

Area Meteorologica

dott. F. Boccanera
dott. F. Iocca
dott. M. Lazzeri
dott. S. Sofia

Si autorizza la riproduzione di testi e dati indicando la fonte

Centro Funzionale Regionale
Via del Colle Ameno n.5
60126 Torrette – Ancona
Tel. 071/8067747 - 071/8067753
spc.centrofunzionale@regione.marche.it
<http://protezionecivile.regionemarche.it>



Sommario

<i>Introduzione</i>	3
<i>Dati utilizzati</i>	5
ANALISI DELLE SERIE STORICHE DI TEMPERATURA ATTRAVERSO LA TEORIA DEI VALORI ESTREMI	6
<i>La Teoria dei Valori Estremi</i>	6
<i>Applicazione della EVT ai dati di temperatura</i>	8
ANALISI DELLE SERIE STORICHE DI ONDATE DI CALORE SUL TERRITORIO DELLA REGIONE MARCHE	15
<i>La definizione di ondata di calore secondo l' "Heat-wave magnitude index daily"</i>	15
<i>Analisi delle serie storiche dell'indice HWMId mediate sull'intero territorio regionale</i>	16
<i>Analisi delle serie storiche dell'indice HWMId sulle singole località</i>	19
<i>Risultati</i>	23
<i>Sviluppi</i>	25
Bibliografia	26



ANALISI STATISTICA DEGLI EVENTI ESTREMI DI TEMPERATURA ED ONDATE DI CALORE NEL TERRITORIO DELLA REGIONE MARCHE

Introduzione

Il presente lavoro, a cura dell'area meteorologica del Centro Funzionale Regionale, si colloca tra le attività volte alla conoscenza e all'approfondimento degli aspetti climatici del territorio marchigiano.

Già lavori precedenti (Amici et al.), realizzati dal Servizio Protezione Civile della Regione Marche con il supporto dell'Osservatorio Geofisico Sperimentale di Macerata, hanno caratterizzato il clima marchigiano per quanto riguarda il campo di precipitazione e di temperatura media, evidenziando, tra l'altro, delle variazioni temporali dei principali parametri climatici negli ultimi 50-60 anni.

Il presente studio, ad integrazione dei precedenti, si focalizza sugli eventi estremi di temperatura e sulle ondate di calore, con lo scopo di caratterizzare il territorio regionale ed indagare eventuali variazioni di lungo periodo; questo si rivela di primaria importanza soprattutto quando si vanno a valutare gli impatti che tali eventi estremi possono determinare sul tessuto socio-economico e alle relative risposte, anche di protezione civile.

Le fasi di freddo estremo, oltre all'aumento della mortalità specie tra i senzatetto, comportano infatti impatti non indifferenti sul comparto agricolo, specie quando queste avvengono agli inizi o alla fine del periodo di crescita delle colture. Sul fronte energetico, le fasi di freddo estremo comportano un aumento del fabbisogno energetico per il riscaldamento domestico, spesso aggravate dalle frequenti interruzioni o guasti nelle linee elettriche; infine tali eventi possono determinare criticità anche sul fronte dei trasporti, specie per la formazione di ghiaccio al suolo, con potenziali ripercussioni sulla viabilità stradale e sui trasporti ferroviari ed aerei.

Anche le fasi di caldo estremo possono avere degli impatti importanti sul tessuto socio-economico; in agricoltura infatti, dove spesso le fasi molto calde sono associate anche a condizioni di siccità, possono prodursi condizioni di sottoproduzione sia sul fronte dei raccolti che su quello degli allevamenti. L'incremento della richiesta di energia elettrica, durante le ondate di calore, è ben



REGIONE MARCHE

Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale



documentata e può determinare un sovraccarico sulle linee che può portare spesso a black-out; possono infine determinarsi gravi danni al patrimonio forestale a causa dell'aumento della pericolosità degli incendi boschivi.

Discorso a parte merita l'impatto delle fasi di caldo estremo sulla salute umana; all'ondata di calore dell'anno 2003, tra le più intense del continente europeo, sono infatti attribuibili 4000 decessi in Italia, quasi 15000 in Francia (+55%) e oltre 2000 in Gran Bretagna.

Infine, come documentato in diversi studi, l'incremento della temperatura media globale determinerà l'aumento, anche in Europa, della magnitudo e della frequenza degli eventi estremi di temperatura, e con essi gli impatti sulla società, sull'economia e sugli ecosistemi naturali.

Il presente lavoro si compone principalmente di due parti: nella prima viene illustrata l'analisi degli eventi estremi di temperatura sulle Marche attraverso l'utilizzo della Teoria dei Valori Estremi, indagando, in particolare, la caratterizzazione spaziale e la presenza di trend temporali nei principali parametri della distribuzione. La seconda parte si focalizza invece sugli episodi di ondate di calore, definite secondo un opportuno indice, analizzandone la caratterizzazione spaziale e, anche in questo caso, indagando l'eventuale presenza di trend temporali.



Dati utilizzati

Per lo studio sono stati utilizzati i dati di temperatura minima e massima giornalieri provenienti da 17 stazioni della rete Meteo-Idro-Pluviometrica Regionale (rete MIR), di proprietà del Servizio Protezione Civile della Regione Marche ed omogenee dal punto di vista statistico. Le stazioni possono essere così suddivise:

- 7 stazioni di *pianura* (quota altimetrica inferiore ai 200 mslm)
- 8 stazioni di *collina* (quota altimetrica compresa tra i 200 mslm ed i 600 mslm)
- 2 stazioni di *montagna* (quota altimetrica oltre i 600 mslm)

Il periodo di inizio dello studio si colloca, a seconda della stazione, tra l'anno 1957 e l'anno 1960, mentre la fine del periodo di studio è rappresentato, per tutte, dall'anno 2017. Il dettaglio delle stazioni e la loro localizzazione è riportata in tabella 1 e in figura 1.

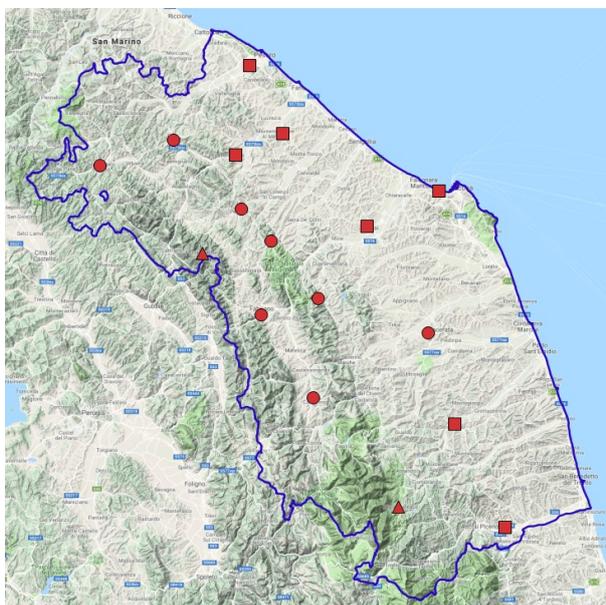


Figura 1: localizzazione delle stazioni (quadrato=stazioni di pianura; cerchio= stazioni di collina; triangolo= stazioni di montagna)

Località	Quota (m)	Periodo
Ancona	5	1961-2017
Pesaro	22	1957-2017
Ascoli Piceno	78	1961-2017
Fossombrone	96	1968-2017
Jesi	100	1961-2017
Piagge	189	1957-2017
Servigliano	197	1961-2017
Pergola	242	1961-2017
Macerata	294	1961-2017
Sant'Angelo in Vado	352	1968-2017
Fabriano	354	1961-2017
Urbino	471	1961-2017
Arcevia	535	1961-2017
Poggio San Vicino	580	1957-2017
Camerino	581	1957-2017
Serra Sant'Abbondio	690	1961-2017
Montemonaco	995	1961-2017



ANALISI DELLE SERIE STORICHE DI TEMPERATURA ATTRAVERSO LA TEORIA DEI VALORI ESTREMI

La Teoria dei Valori Estremi

La Teoria dei Valori Estremi (*Extreme Value Theory, EVT*) si è rivelata una delle più importanti discipline statistiche degli ultimi 50 anni, ed è a tutt'oggi largamente usata in diversi ambiti; i principali risultati della EVT riguardano la distribuzione limite degli estremi del campione, siano essi massimi o minimi.

La EVT si focalizza sul comportamento statistico dell'insieme

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$$

dove X_1, \dots, X_n è una sequenza di osservazioni indipendenti che hanno la stessa funzione di distribuzione F , non necessariamente conosciuta. Nella pratica, i valori X_i rappresentano i valori di un processo misurati ad intervalli di tempo regolari (per esempio, misurazioni orarie del livello del mare o temperature medie giornaliere), per cui M_n rappresenta il valore massimo del processo su n unità di tempo di osservazione. Se n rappresenta il numero di osservazioni in un anno, allora M_n corrisponde al valore massimo annuale.

L'intero range delle possibili distribuzioni limite per M_n^* (che rappresenta una rinormalizzazione dei valori M_n , $M_n^* = (M_n - a_n) / b_n$), secondo il Teorema dei Valori estremi è dato da una famiglia di distribuzioni $G(z)$ (*Distribuzione Generale dei Valori Estremi, GEV*) definita come segue:

$$G(z) = \exp\left\{-\left[1 + \varepsilon\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{-1}{\varepsilon}}\right\}$$

dove i parametri soddisfano le condizioni $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ e $-\infty < \varepsilon < \infty$. Il modello si compone quindi di tre parametri: un parametro di locazione μ (che specifica dove la distribuzione è centrata), un parametro di scala σ e un parametro di forma ε . Un esempio di distribuzione GEV è riportato in figura 2. Se $\varepsilon = 0$, allora la distribuzione assume la seguente forma:



$$G(z) = \exp \left[-\exp \left\{ -\left(\frac{z - \mu}{\sigma} \right) \right\} \right]$$

Una volta ricavati i parametri della distribuzione, la cui stima è possibile attraverso l'utilizzo di metodi di massima verosomiglianza, è possibile calcolare il livello z_p associato al tempo di ritorno $1/p$, dove $G(z_p)=1-p$:

$$z_p = \mu - \frac{\sigma}{\epsilon} [1 - \{-\log(1 - p)\}^{-\epsilon}], \epsilon \neq 0$$

$$z_p = \mu - \sigma \log\{-\log(1 - p)\}, \epsilon = 0$$

Nel caso di processi non stazionari, e cioè che cambiano sistematicamente nel tempo, la distribuzione GEV per z_t con parametri μ , σ ed ϵ e relativa al massimo annuale nell'anno t , sarà:

$$Z_t \approx \text{GEV}(\mu(t), \sigma, \epsilon)$$

dove

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t$$

In questo modo, la variazione nel tempo dei processi osservati è modellizzata attraverso un trend lineare del parametro di locazione; trend simili possono comunque essere introdotti anche per il parametro di scala, oppure espressi, anziché rispetto al tempo, rispetto ad altre variabili.

Con la possibilità quindi di modellizzare ogni combinazione possibile di parametri della distribuzione come funzioni del tempo o di altre variabili, la selezione del modello più adatto diviene fondamentale. A tale scopo può essere usato il *test di massima verosimiglianza* dei modelli innestati, che fornisce una semplice procedura per valutare la bontà di un modello rispetto ad un altro.

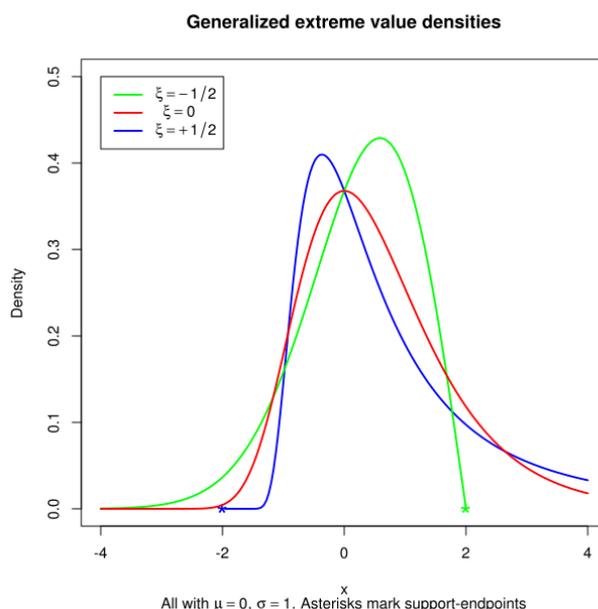


figura 2: esempi di Generalized Extreme Value Distribution

Applicazione della EVT ai dati di temperatura

I dati storici di temperatura massima e minima giornaliera, relativi alle 17 stazioni meteorologiche, sono stati analizzati secondo i dettami della EVT. Gli eventi estremi sono stati identificati secondo l'approccio *block-maxima*, e cioè suddividendo il dataset in blocchi di un anno e prendendo i massimi ed i minimi annuali di ognuna delle serie storiche (figura 3). Tale dataset è stato poi modellizzato attraverso una distribuzione GEV, dapprima nel caso stazionario e successivamente introducendo una dipendenza lineare nel tempo del parametro di localizzazione.

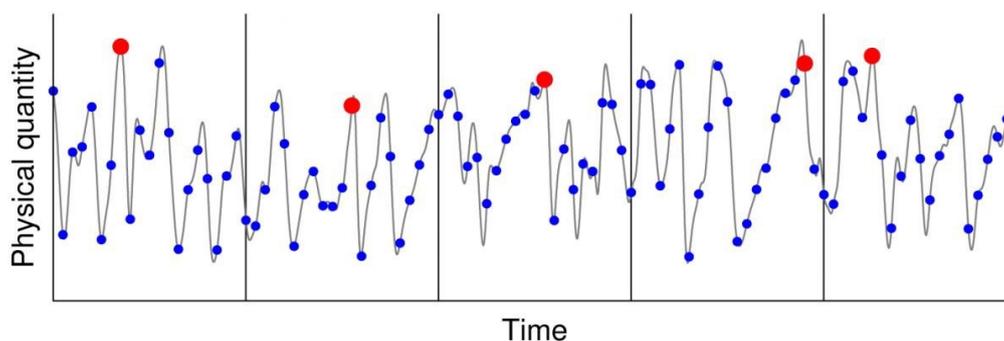


Figura 3: schematizzazione dell'approccio "Block Maxima"



REGIONE MARCHE

Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale

Come prima analisi, i valori di temperatura massima annuale sono stati modellizzati attraverso un modello stazionario; di seguito sono riportate le stime dei tre parametri della distribuzione GEV per ognuna delle 17 stazioni e le temperature relative al tempo di ritorno di 20 anni (figura 4).

Analizzando la tabella, si nota come tutte le stazioni mostrino un valore negativo del parametro di forma, indice di una distribuzione GEV di tipo III (Weibull). La mappa relativa alla distribuzione spaziale indica invece una forte dipendenza del tempo di ritorno a 20 anni dal contesto orografico nella quale la stazione è inserita: i valori massimi di temperatura, infatti, sono quelli relativi alle stazioni di fondovalle o di bassa collina ubicate nel comparto collinare della regione. Tali località, infatti, non beneficiano né del refrigerio associato alla circolazione di brezza marina, come accade invece alle località costiere, né delle migliori condizioni di ventilazione e ricambio di aria che si sperimenta invece alle quote più elevate.

località	σ	ξ	μ
Sant'Angelo in Vado	1.9 ± 0.2	-0.24 ± 0.11	35.1 ± 0.3
Urbino	2.3 ± 0.3	-0.43 ± 0.13	33.4 ± 0.3
Pergola	2.3 ± 0.2	-0.22 ± 0.08	35.6 ± 0.3
Serra Sant'Abbondio	2.3 ± 0.2	-0.33 ± 0.08	32.3 ± 0.3
Jesi	2.0 ± 0.2	-0.25 ± 0.08	36.4 ± 0.3
Pesaro	2.1 ± 0.2	-0.28 ± 0.07	34.3 ± 0.3
Arcevia	2.5 ± 0.3	-0.25 ± 0.10	34.1 ± 0.4
Montemonaco	2.4 ± 0.2	-0.18 ± 0.09	32.1 ± 0.4
Fossombrone	2.4 ± 0.3	-0.35 ± 0.1	37.6 ± 0.4
Servigliano	2.8 ± 0.3	-0.25 ± 0.1	35.6 ± 0.4
Ascoli Piceno	2.2 ± 0.2	-0.18 ± 0.09	37 ± 0.3
Fabriano	2.1 ± 0.2	-0.24 ± 0.06	35.1 ± 0.3
Macerata	2.4 ± 0.3	-0.16 ± 0.10	35.4 ± 0.4
Ancona	2.0 ± 0.2	-0.11 ± 0.13	35.3 ± 0.3
Camerino	2.3 ± 0.3	-0.29 ± 0.08	32.4 ± 0.4
Poggio San Vicino	2.2 ± 0.2	-0.27 ± 0.08	33.3 ± 0.3
Piagge	2.3 ± 0.2	-0.29 ± 0.09	34.8 ± 0.3

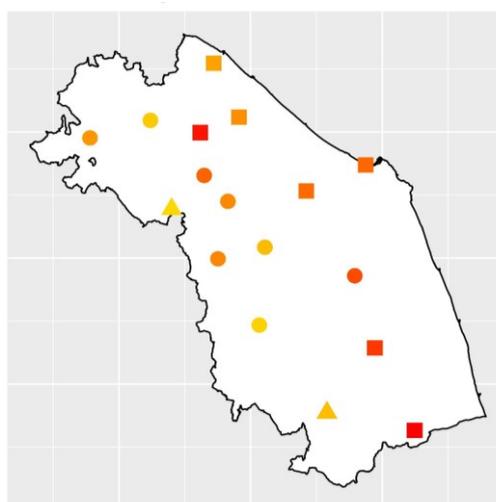


Figura 4: valori di temperatura massima associati ad un tempo di ritorno di 20 anni

Prendendo invece in considerazione il caso non stazionario, nel quale si è ipotizzata una dipendenza lineare nel tempo del parametro di localizzazione, si nota come nella maggior parte delle stazioni il trend (parametro μ_1) risulti essere positivo e dotato di significatività statistica; fanno eccezione solo 5 località, dove il trend è risultato non significativo. Ciò sta a significare la presenza di un cambiamento



REGIONE MARCHE

Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale

climatico in atto, almeno per quello che riguarda gli eventi estremi di temperatura massima, che hanno visto un incremento della magnitudo all'interno del periodo considerato su gran parte della regione.

stazione	μ_0 (°C)	μ_1 (°C/y)	pvalue
Sant'Angelo in Vado	33.8 ± 0.5	0.06 ± 0.02	< 0.01
Urbino	31.7 ± 0.4	0.07 ± 0.01	< 0.01
Pergola	34.8 ± 0.7	0.03 ± 0.02	0.138
Serra Sant'Abbondio	31.2 ± 0.4	0.05 ± 0.01	< 0.01
Jesi	36.2 ± 0.6	0.00 ± 0.02	0.795
Pesaro	32.7 ± 0.5	0.06 ± 0.01	< 0.01
Arcevia	31.8 ± 0.6	0.09 ± 0.02	< 0.01
Montemonaco	31.4 ± 0.7	0.03 ± 0.02	0.219
Fossombrone	36.5 ± 0.7	0.04 ± 0.02	0.057
Servigliano	32.3 ± 0.5	0.13 ± 0.02	< 0.01
Ascoli Piceno	35.3 ± 0.6	0.06 ± 0.02	< 0.01
Fabriano	33.7 ± 0.6	0.05 ± 0.02	0.014
Macerata	33.6 ± 0.7	0.07 ± 0.02	< 0.01
Ancona	33 ± 0.5	0.09 ± 0.01	< 0.01
Camerino	31.5 ± 0.6	0.04 ± 0.02	0.046
Poggio San Vicino	32.9 ± 0.6	0.01 ± 0.02	0.402
Piagge	33.5 ± 0.6	0.04 ± 0.02	0.016

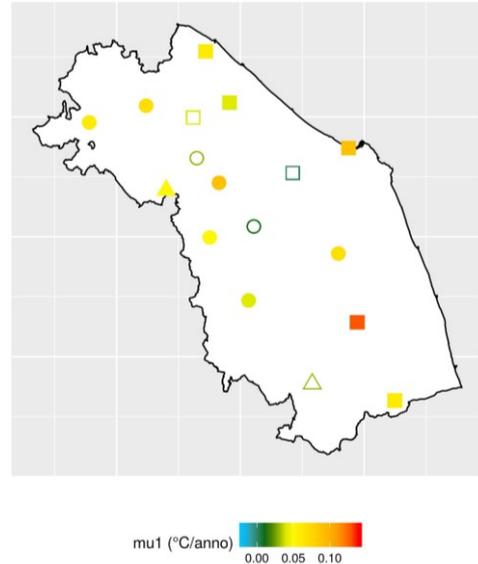


Figura 5: distribuzione spaziale del trend annuo del parametro di locazione e sua significatività statistica (simbolo vuoto = trend non significativo)

Lo stesso tipo di analisi è stato condotto prendendo in considerazione i minimi annuali delle temperature minime giornaliere, che rappresentano quindi gli eventi estremi più freddi. Modellizzando i dataset delle 17 stazioni in esame sotto l'assunzione di stazionarietà e calcolandone i tempi di ritorno a 20 anni (figura 6), si evince che le località alle quali sono associate temperature più basse sono quelle del comparto interno della regione. Oltre infatti a Montemonaco, la stazione alla quota più elevata, le temperature più basse sono quelle associate alle località di Pergola (-15.3°C), Sant'Angelo in Vado (-14.5°C) e Fabriano (-14.2); anche in questo caso si rileva una forte dipendenza dall'orografia, essendo queste stazioni ubicate in conche o nel fondovalle, dove le inversioni termiche invernali tendono ad essere più intense e persistenti. Da notare inoltre la marcata differenza tra la temperature di Ancona e Pesaro, che vede quest'ultima su valori significativamente più bassi; un'ulteriore conferma del fatto che il settore costiero settentrionale, dal punto di vista climatico, risente in maniera importante dell'aria fredda che staziona in inverno sul catino padano.



stazione	σ	ξ	μ
Sant'Angelo in Vado	2.5 ± 0.3	-0.09 ± 0.11	-8 ± 0.4
Urbino	2.1 ± 0.2	-0.11 ± 0.11	-4.2 ± 0.3
Pergola	2.8 ± 0.3	-0.05 ± 0.13	-7.6 ± 0.4
Serra Sant'Abbondio	2.2 ± 0.2	-0.17 ± 0.09	-6.1 ± 0.3
Jesi	1.9 ± 0.2	0.11 ± 0.12	-3.9 ± 0.3
Pesaro	2.3 ± 0.2	-0.01 ± 0.09	-3.9 ± 0.3
Arcevia	2.4 ± 0.2	-0.21 ± 0.08	-4.7 ± 0.3
Montemonaco	2.6 ± 0.3	-0.19 ± 0.07	-7.5 ± 0.4
Fossombrone	2.8 ± 0.3	-0.07 ± 0.09	-5.4 ± 0.4
Servigliano	2.7 ± 0.3	-0.2 ± 0.12	-5.5 ± 0.4
Ascoli Piceno	2.1 ± 0.2	-0.1 ± 0.08	-2.7 ± 0.3
Fabriano	2.4 ± 0.2	-0.06 ± 0.09	-7.7 ± 0.4
Macerata	2.2 ± 0.2	-0.13 ± 0.08	-2.9 ± 0.3
Ancona	2 ± 0.2	-0.07 ± 0.09	-0.8 ± 0.3
Camerino	2.3 ± 0.3	-0.38 ± 0.13	-5.7 ± 0.4
Poggio San Vicino	2.5 ± 0.3	-0.27 ± 0.08	-4.2 ± 0.4
Piagge	2.4 ± 0.3	-0.12 ± 0.09	-2.7 ± 0.4

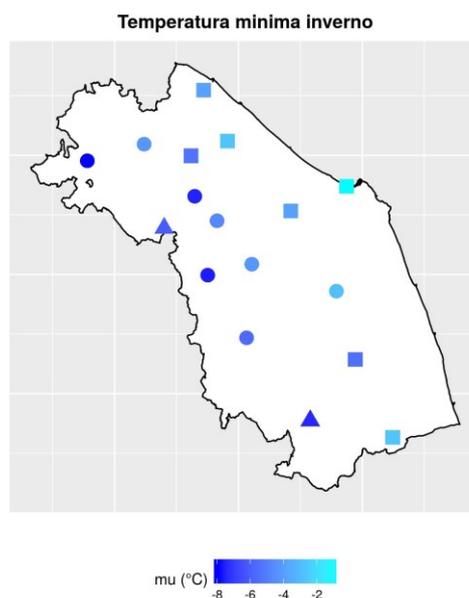


Figura 6: distribuzione spaziale del trend annuo del parametro di locazione e sua significatività statistica (simbolo vuoto = trend non significativo)

Ipotizzando anche in questo caso un trend nel parametro di locazione (figura 7), si evince che anche gli eventi estremi più freddi hanno mostrato un trend positivo nel tempo, ma questo è risultato statisticamente significativo solo in alcune località del settore collinare e costiero centro-settentrionale, e di magnitudo mediamente inferiore rispetto agli estremi di temperatura massima.

stazione	μ_0 (°C)	μ_1 (°C/y)	pvalue
Sant'Angelo in Vado	-7.4 ± 0.7	-0.02 ± 0.02	0.357
Urbino	-5.7 ± 0.7	0.05 ± 0.02	0.020
Pergola	-10 ± 0.8	0.08 ± 0.02	0.001
Serra Sant'Abbondio	-6.1 ± 0.7	0.00 ± 0.02	0.994
Jesi	-5.2 ± 0.6	0.04 ± 0.02	0.008
Pesaro	-5 ± 0.5	0.04 ± 0.02	0.024
Arcevia	-5.4 ± 0.8	0.02 ± 0.02	0.314
Montemonaco	-8.5 ± 0.9	0.03 ± 0.03	0.257
Fossombrone	-6.4 ± 0.8	0.04 ± 0.03	0.150
Servigliano	-5.1 ± 0.8	-0.01 ± 0.02	0.543
Ascoli Piceno	-2.8 ± 0.7	0.00 ± 0.02	0.858
Fabriano	-8.1 ± 0.7	0.01 ± 0.02	0.459
Macerata	-4 ± 0.6	0.04 ± 0.02	0.036
Ancona	-1.4 ± 0.6	0.02 ± 0.02	0.274
Camerino	-5.6 ± 0.7	0 ± 0.02	0.956
Poggio San Vicino	-5.1 ± 0.7	0.03 ± 0.02	0.134
Piagge	-3.6 ± 0.8	0.03 ± 0.02	0.236

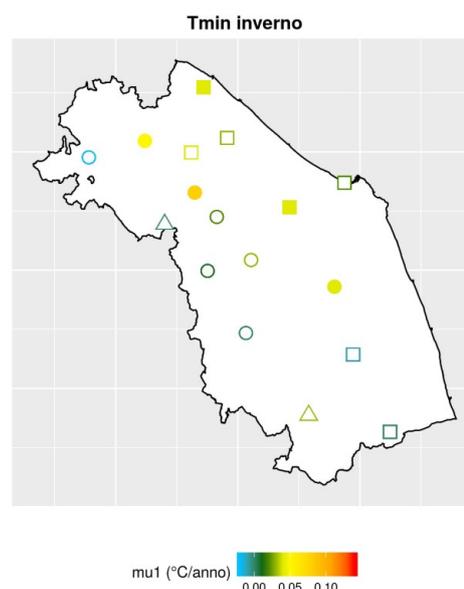


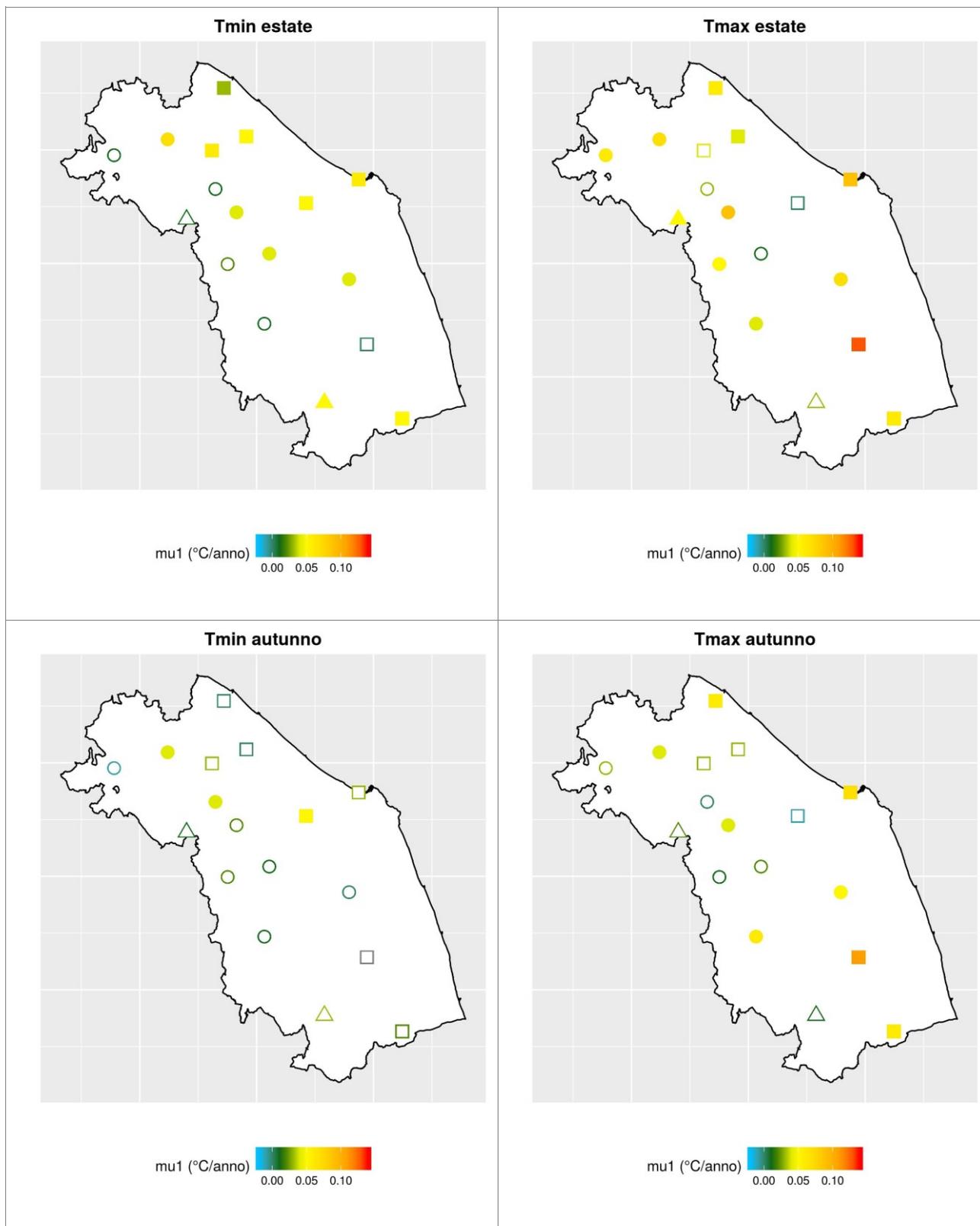
Figura 7: distribuzione spaziale del trend annuo del parametro di locazione e sua significatività statistica (simbolo vuoto = trend non significativo)



REGIONE MARCHE
Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale



Le analisi nel caso non stazionario sono state effettuate anche a scala stagionale, sia per quello che riguarda gli estremi più freddi che per quelli più caldi (figura 8). A livello stagionale si può quindi affermare che esiste un trend positivo, in generale più evidente se si analizzano le temperature massime. Per quanto riguarda le temperature minime, il trend in estate è risultato positivo su gran parte delle stazioni, mentre nelle altre stagioni il trend è risultato positivo solo su un sottoinsieme limitato di località generalmente ubicate nel settore centro-settentrionale della regione. Per quanto riguarda le temperature massime, invece, il trend del parametro di localizzazione è risultato positivo specie per la primavera, solo per poche stazioni in inverno, ed è risultato generalmente più elevato nel settore centro-meridionale della regione. Da segnalare la stazione montana di Montemonaco che non ha fatto registrare trend significativi in nessuna stagione e per nessuno dei parametri presi in considerazione.





REGIONE MARCHE
Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale

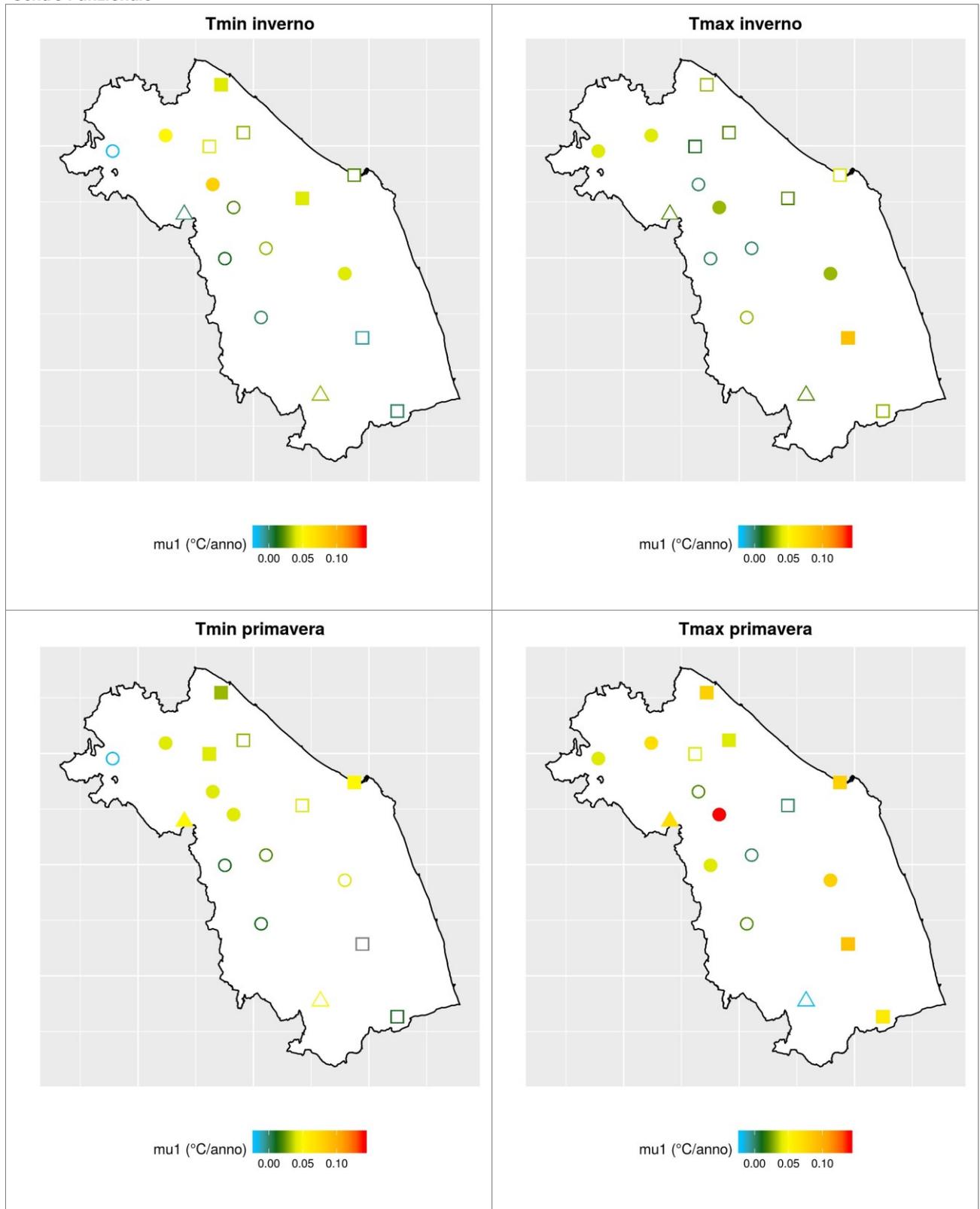


Figura 8: distribuzione spaziale del trend annuo del parametro di locazione e sua significatività statistica (simbolo vuoto = trend non significativo), a livello stagionale sia per le temperature massime che per le temperature minime



REGIONE MARCHE
 Servizio Protezione Civile
 Centro Funzionale

ANALISI DELLE SERIE STORICHE DI ONDATE DI CALORE SUL TERRITORIO DELLA REGIONE MARCHE

La definizione di ondata di calore secondo l' "Heat-wave magnitude index daily"

L'indice "Heat-wave magnitude index daily" (HWMId) (Russo et al., 2015) rappresenta un miglioramento dell'indice HWMI (Russo et al., 2014); è definito come la magnitudo massima delle ondate di calore in un anno, dove l'ondata di calore è definita come un periodo di almeno tre giorni consecutivi nei quali la temperatura massima è superiore ad una soglia giornaliera ricavata dalla climatologia 1981-2010.

La soglia giornaliera è definita come il 90° percentile della temperatura massima giornaliera, calcolato su una finestra di 31 giorni centrata sul giorno in questione; quindi, per un dato giorno d , la soglia giornaliera coincide con il 90° percentile del seguente dataset A_d :

$$A_d = \bigcup_{y=1981}^{2010} \bigcup_{i=d-15}^{d+15} T_{y,i}$$

dove il simbolo U denota l'unione dei dataset e $T_{y,i}$ è la temperatura massima giornaliera nel giorno i dell'anno y .

L'indice HWMId è definito quindi come la somma delle magnitudo delle giornate che compongono l'ondata di calore, con la magnitudo giornaliera che è data da:

$$M_d(T_d) = \begin{cases} \frac{T_d - T_{30y25p}}{T_{30y75p} - T_{30y25p}} & \text{if } T_d > T_{30y25p} \\ 0 & \text{if } T_d \leq T_{30y25p} \end{cases}$$

dove con T_d si indica la temperatura massima giornaliera del giorno d , T_{30y25p} e T_{30y75p} sono, rispettivamente, il 25° ed il 75° percentile della serie storica formata dalle temperature massime annuali nel periodo di riferimento 1981-2010. Per definizione, il valore della magnitudo è relativo ad ogni specifica località, dal momento che lo sono i valori di T_{30y25p} e T_{30y75p} .



REGIONE MARCHE

Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale

Il denominatore della funzione M_d , definito come la differenza tra T_{30y75p} e T_{30y25p} , rappresenta il range interquartile (IQR) delle massime annuali nel trentennio di riferimento 1981-2010; per ogni località specifica, rappresenta una misura non parametrica della variabilità della serie temporale. Se una giornata che compone l'ondata di calore ha un valore di temperatura massima $T_d = T_{30y75p}$, allora la sua magnitudo sarà pari ad 1; quindi, l'unità di magnitudo giornaliera dell'ondata di calore è equivalente a quella di una giornata con temperatura pari a T_{30y75p} ed un'anomalia corrispondente uguale al IQR dei massimi annuali 1981-2010.

La definizione dell'indice HWMI_d qui riportata è relativa ai valori di temperatura massima giornaliera; nulla vieta di caratterizzare l'ondata di calore, calcolandone l'indice, a partire dai valori di temperatura minima giornaliera, dal momento che le condizioni di disagio fisiologico sono anche funzione dell'entità del raffreddamento dell'aria nelle ore notturne.

Analisi delle serie storiche dell'indice HWMI_d mediate sull'intero territorio regionale

Si è quindi proceduto ad un'analisi delle serie storiche di temperatura attraverso il calcolo dell'indice HWMI_d e la successiva caratterizzazione spaziale e ricerca di eventuali trend temporali.

Come primo ambito, è stato studiato l'andamento temporale della magnitudo dell'ondata di calore più intensa, mediato sulle 17 stazioni, nel periodo 1961-2017 (fig. 9). Dal grafico emerge in maniera abbastanza evidente come vi sia stato un incremento generalizzato della magnitudo delle ondate di calore a partire dai primi anni 2000. La magnitudo più elevata è stata registrata nell'anno 2003, seguito dall'anno 2007 e dagli anni 2000 e 2017. Per quanto riguarda la prima parte del periodo in esame, si pone in evidenza solamente l'anno 1983, ma con un valore di magnitudo sensibilmente inferiore rispetto alle annate precedentemente citate.

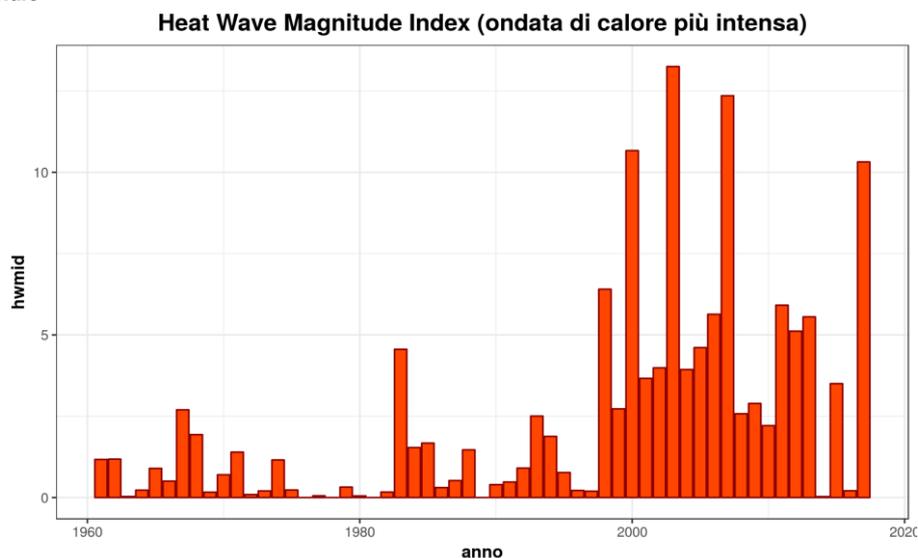


Figura 9: valori annui dell'HWMI mediato su tutte le stazioni e riferito all'ondata di calore più intensa

Prendendo in considerazione non solo l'ondata di calore di massima magnitudo, ma tutti gli episodi di ondate di calore per ogni anno (figura 10), i risultati rimangono sostanzialmente gli stessi, ma la magnitudo totale relativa all'anno 2003 risulta di molto superiore rispetto alle altre annate.

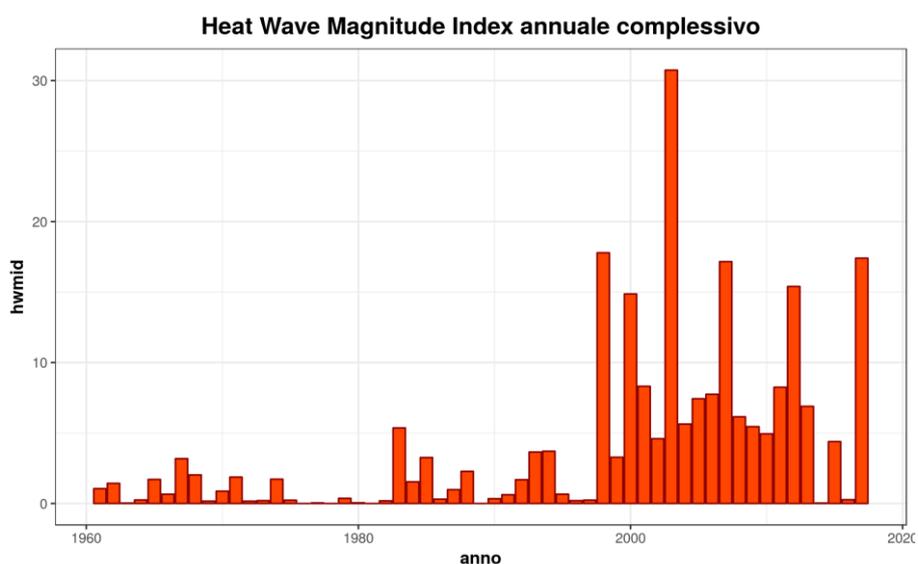


Figura 10: valori annui dell'HWMI mediato su tutte le stazioni e riferito a tutte le ondate di calore

Andando infine a valutare la durata complessiva delle ondate di calore per ogni anno, si nota come solo l'anno 2003 abbia superato i 40 giorni; per il resto, sono stati



REGIONE MARCHE

Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale

solo quattro gli anni le cui durate sono state comprese tra i 20 ed i 30 giorni, mentre tutte le altre annate hanno mostrato durate delle ondate di calore inferiori ai 20 giorni.

Anche sulle Marche, quindi, le ondate di calore dell'anno 2003 si confermano come le più intense all'interno del periodo di studio.

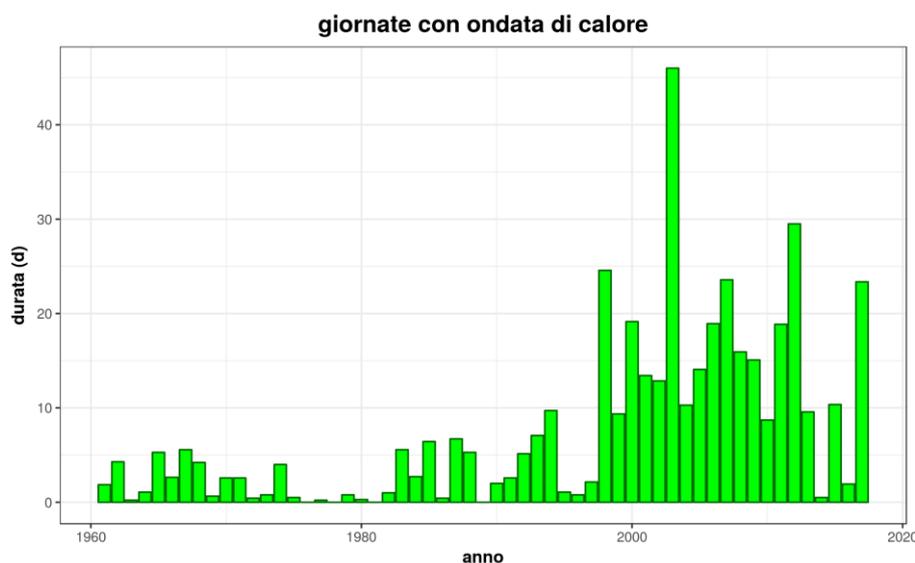


Figura 11: durata complessiva (giorni), mediata sulle 17 stazioni, relativa a tutte le ondate di calore dell'anno

La stessa valutazione è stata effettuata anche partendo dalle serie storiche di temperatura minima giornaliera, per le quale si riporta il grafico relativo alla magnitudo complessiva di tutte le ondate di calore nell'anno, mediate su tutte le stazioni. Le considerazioni sono sostanzialmente le stesse fatte per le temperature massime, ma in questo caso la magnitudo massima è associata all'anno 2017 e risulta essere di poco superiore a quella dell'anno 2003.

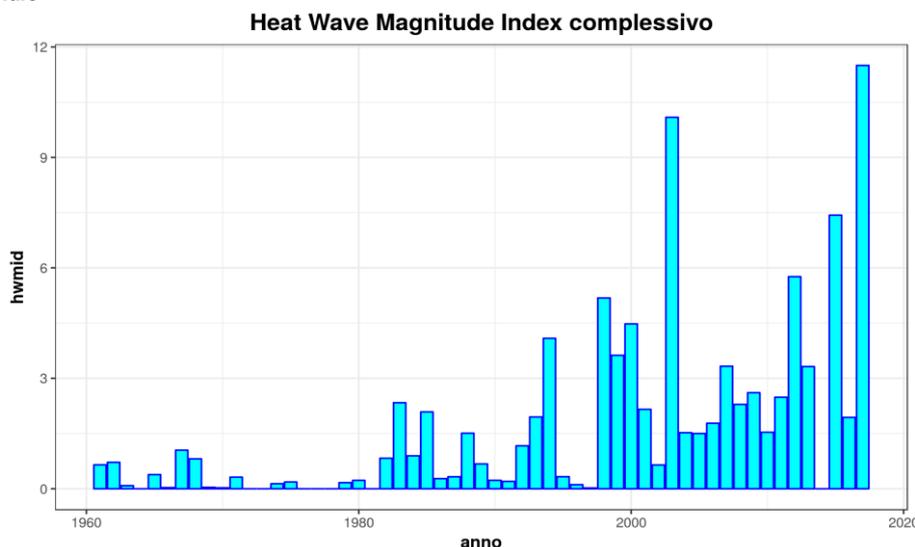


Figura 12: valori annui dell'HWMId, mediato su tutte le stazioni e riferito a tutte le ondate di calore, calcolato a partire dalla temperature minime

Analisi delle serie storiche dell'indice HWMId sulle singole località

Andando a considerare le singole stazioni, si riportano di seguito alcuni valori assoluti:

- il più alto valore dell'indice per una singola ondata di calore è stato registrato dalla stazione di Montemonaco che, nell'anno 2007, ha toccato il valore di 27;
- Il più alto valore dell'indice complessivo in un anno è stato registrato dalla stazione di Ancona, che nell'anno 2003 ha di poco superato il valore di 80;
- la massima durata di una singolo episodio di ondata di calore è stata di 28 giorni ed è stata rilevata nella stazione di Ancona nell'anno 2008.

La mappa relativa alla magnitudo complessiva annuale (figura 13), mediata sull'intero periodo di studio, mostra dei valori dell'indice generalmente più elevati nel settore meridionale della regione, con il valore massimo registrato dalla stazione di Servigliano; valori più bassi dell'indice sono stati invece rilevati nel settore centro-settentrionale, con il valore minimo associato alla stazione di Pesaro. Per quanto riguarda il trend, calcolato attraverso il Sen's Slope, questo è risultato non significativo soltanto su tre stazioni; per quanto riguarda le altre, il trend si conferma positivo, e con valori più elevati nel settore meridionale della regione.

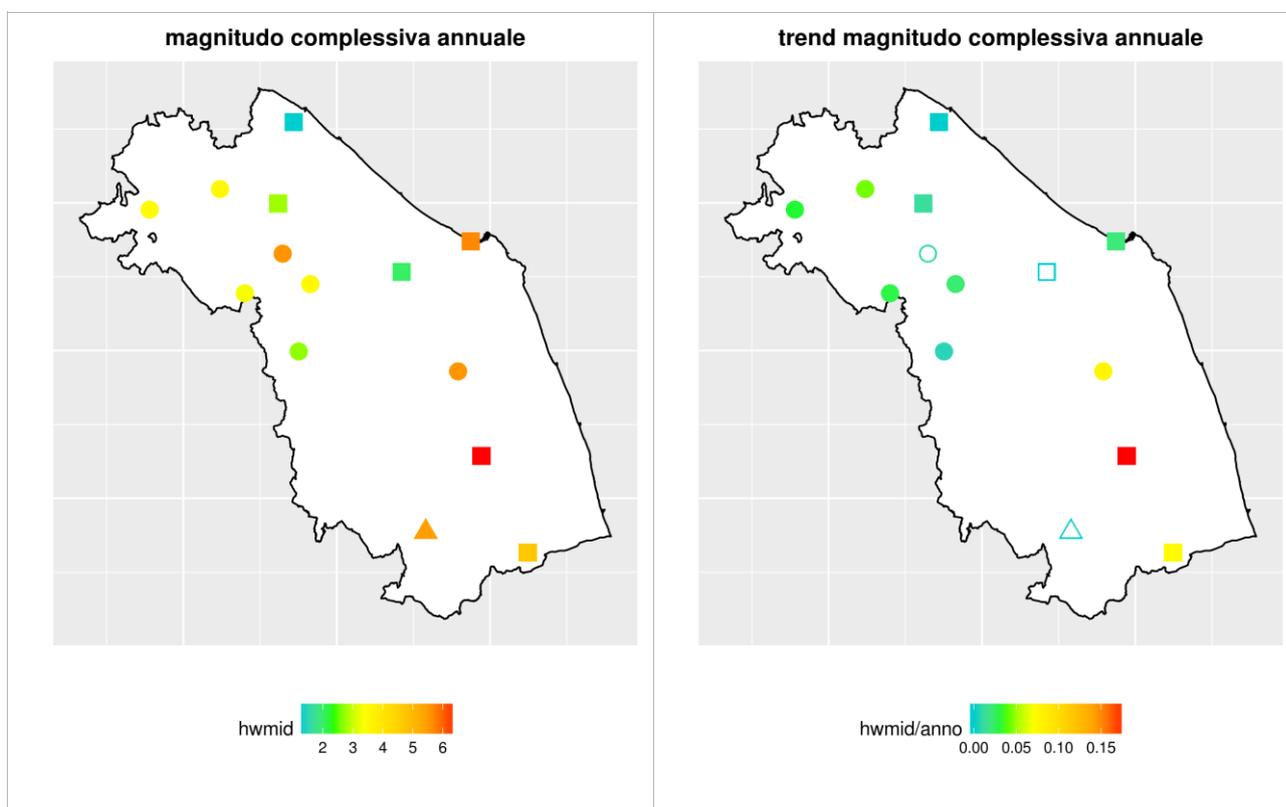


Figura 13: sx: distribuzione spaziale della magnitudo complessiva (media annuale) - dx: distribuzione spaziale del trend annuo e sua significatività statistica (simbolo vuoto = trend non significativo)

Anche andando a valutare il numero complessivo annuo di giornate con ondata di calore, mediato sull'intero periodo (figura 14), si rilevano valori più alti nel settore meridionale della regione, sia a livello di numero medio di giornate che a livello di trend temporale. Anche in questo caso, il trend è risultato non significativo sulle stesse tre località.

L'indice HWMId è funzione sia del valore di temperatura che della durata dell'ondata di calore; alti valori dell'indice, quindi, possono anche essere associati ad eventi prolungati ma di bassa magnitudo giornaliera o ad eventi più brevi ma caratterizzati da valori termici ben più elevati. Volendo quindi valutare la "potenza" delle singole ondate di calore, esse sono state normalizzate attraverso il rapporto tra la magnitudo e la corrispettiva durata, che corrisponde quindi al valore della magnitudo media giornaliera.

Le mappe in figura 15 mostrano la media del più alto valore di magnitudo giornaliera di ogni anno ed il corrispondente trend temporale ricavato attraverso il



REGIONE MARCHE

Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale

calcolo del Sen's slope. Si evince che le ondate di calore di magnitudo giornaliera più elevata si sono generalmente verificate nel settore meridionale e nel settore interno settentrionale della regione. Spiccano i valori della stazione montana di Montemonaco e della stazione di Pergola, mentre il valore più basso è associato alla stazione di Pesaro. Il trend temporale ha mostrato valori più elevati nel settore meridionale, ed è risultato non significativo per tre stazioni. Da notare infine che in tutte e tre le tipologie di mappe il valore più elevato, sia a livello di media che a livello di trend, appartiene alla stazione di Servigliano.

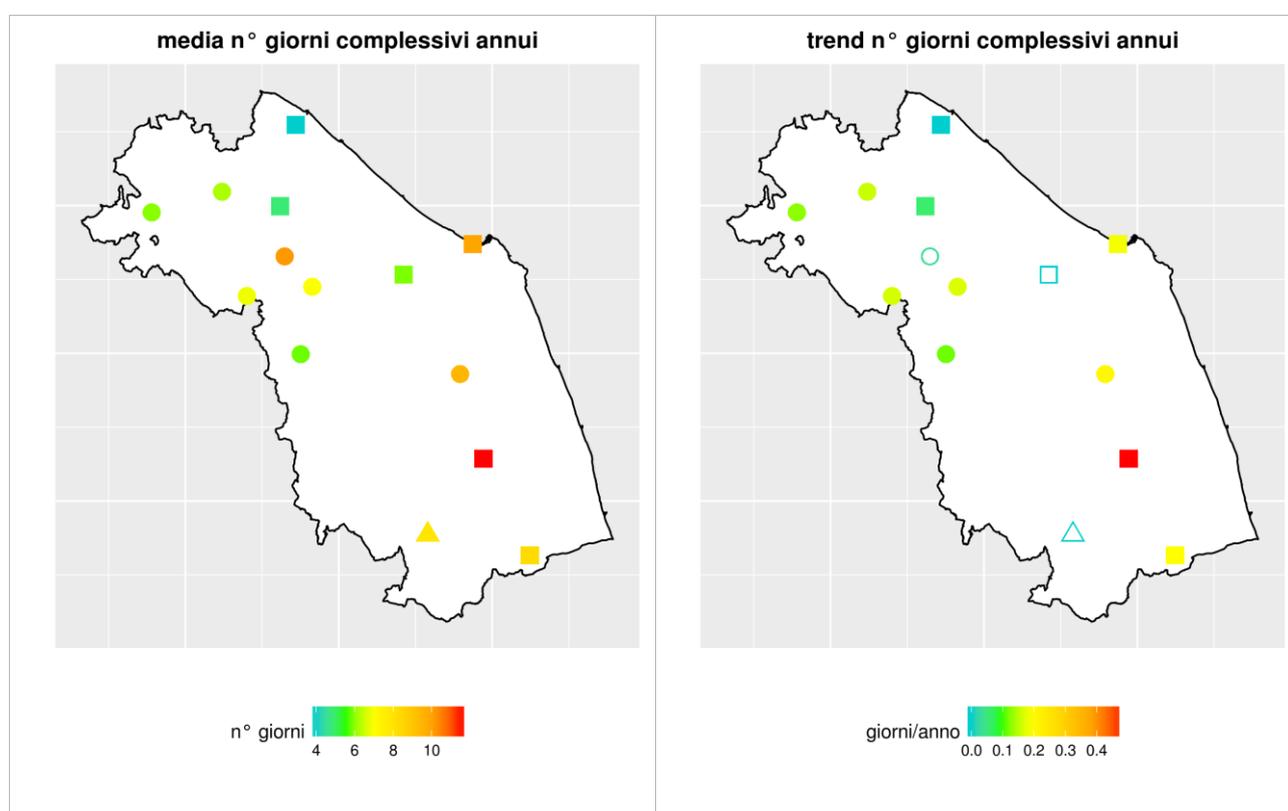


Figura 14: sx: distribuzione spaziale della durata complessiva annua delle ondate di calore - dx: distribuzione spaziale del trend annuo e sua significatività statistica (simbolo vuoto = trend non significativo)



REGIONE MARCHE
Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale

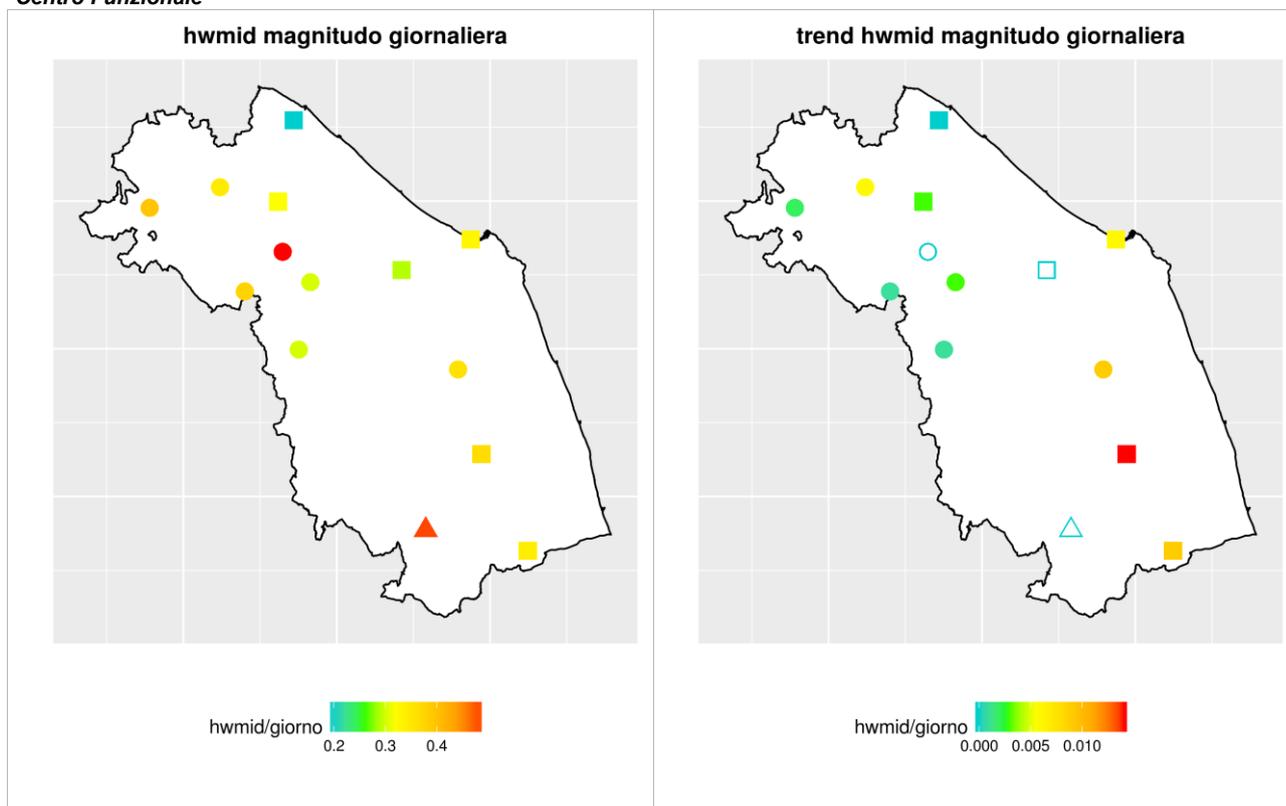


Figura 15: sx: distribuzione spaziale della magnitudo giornaliera massima annuale, mediata su tutti gli anni - dx: distribuzione spaziale del trend annuo e sua significatività statistica (simbolo vuoto = trend non significativo)



Risultati

I principali risultati ottenuti all'interno di questo lavoro possono essere così sintetizzati:

Analisi delle serie storiche di temperatura secondo la teoria dei valori estremi:

- la climatologia degli eventi estremi di temperatura è fortemente influenzata dai fattori orografici; sia per i valori massima che di minima, infatti, gli eventi più estremi sono relativi alle stazioni di fondovalle o di bassa collina ubicate nel comparto collinare della regione.
- per quanto riguarda gli eventi estremi di temperatura massima, il trend del parametro di locazione è risultato positivo su gran parte delle stazioni prese in esame, mentre per quanto riguarda gli eventi estremi associati alle temperature minime, il trend del parametro di locazione è risultato positivo solo su un sottoinsieme limitato di stazioni, per lo più ubicate nel settore centro-settentrionale della regione, con le restanti stazioni che hanno mostrato trend non significativi;
- le due stazioni di montagna hanno mostrato trend non significativi del parametro di locazione in ogni stagione;
- a livello stagionale, il trend del parametro di locazione è risultato positivo, ma in generale in maniera più evidente per gli eventi di temperatura massima;
- per quanto riguarda le temperature massime, il trend del parametro di locazione è risultato positivo specie per la stagione primaverile, mentre in inverno lo è stato solo per poche stazioni; generalmente, i valori più elevati sono stati raggiunti nel settore centro-meridionale della regione;
- per quanto riguarda le temperature minime, il trend del parametro di locazione è risultato positivo solo per la stagione estiva; nelle altre stagioni il trend, comunque positivo, è risultato significativo solo per poche stazioni relative al settore centro-settentrionale della regione

Analisi delle serie storiche di ondate di calore definite secondo l'indice HWMId



REGIONE MARCHE

Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale

- aumento generale della magnitudo e della durata degli episodi di ondata di calore, specie dall'inizio degli anni 2000;
- l'anno in cui si è registrato il più alto valore dell'indice HWMI_d è risultato il 2003; le altre annate caratterizzate dalla magnitudo elevate variano a seconda che l'indice venga calcolato sui dataset di temperature massime o di temperature minime;
- i trend temporali di magnitudo complessiva annuale e di durata complessiva annuale sono risultati positivi e significativi per la maggior parte delle stazioni in esame, mediamente più elevati nel comparto centro-meridionale della regione;
- i massimi valori di magnitudo media giornaliera sono risultati generalmente più elevati nel comparto interno della regione, mentre il trend risulta più elevato nel settore centro-meridionale.



REGIONE MARCHE
Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale



Sviluppi

Il presente studio ha preso in considerazione le serie storiche di temperatura massima e minima giornaliera relative a 17 stazioni meteorologiche omogenee dislocate sull'intero territorio regionale; è auspicabile applicare le stesse metodologie a dataset definiti su grigliato, con lo scopo di aumentare la densità dei punti di studio specie nelle zone dove la rete di monitoraggio presenta una bassa densità spaziale.

Per quanto riguarda la caratterizzazione degli eventi estremi di temperatura mediante l'approccio della EVT, oltre ad indagare l'eventuale presenza di trend sul parametro di scala, sarebbe utile introdurre metodi basati sull'utilizzo di soglie (*Peak Over Threshold o Point Process approach*), con lo scopo di ottimizzare l'utilizzo delle serie storiche di temperatura.

Per quanto riguarda infine la caratterizzazione degli episodi di ondate di calore attraverso l'indice HWMId, potrebbe risultare interessante applicare la metodologia ad una opportuna combinazione delle temperature massime e minime giornaliere, in quanto gli episodi di ondate di calore si caratterizzano per valori termici relativamente elevati anche nelle ore notturne. Di impatto rilevante potrebbe anche risultare l'introduzione delle serie storiche di umidità, purtroppo non presenti nelle località di indagine prima degli anni 2000, per tenere conto del contributo di questa grandezza al disagio fisiologico associato alle ondate di calore.



REGIONE MARCHE
Servizio Protezione Civile
Centro Funzionale



Bibliografia

Adams C., **Impacts of Temperature Extremes**, *Cooperative Institute for Research in the Atmosphere Foothills Research Campus Colorado State University Fort Collins, CO*

Amici M., Spina R., 2002, **Campo medio della precipitazione annuale e stagionale sulle Marche per il periodo 1950-2000**, *Regione Marche, Centro di Ecologia e Climatologia Osservatorio Geofisico Sperimentale di Macerata*

Amici M., Spina R., 2003, **Caratterizzazione climatologica delle Marche: campo medio della temperatura per il periodo 1950-2000**, *Regione Marche, Centro di Ecologia e Climatologia Osservatorio Geofisico Sperimentale di Macerata*

Coles S., 2003, **An Introduction to Statistical Modeling of Extremes Values**, *Springer Series in Statistic*

Gilleland E., Katz R., 2014, **extRemes 2.0: An Extreme Value Analysis Package**, *Journal of Statistical Software*

Katz R., 2010, **Statistics of extremes in climate changes**, *Climatic Change 100: 71-76*

Russo S. et al, 2015, **Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades**, *Environ. Res. Lett. 124003*