

Analisi quantitativa della distribuzione spaziale delle temperature medie in Italia

P. Claps

Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed infrastrutture Civili (DITIC) - Politecnico di Torino
[claps@polito.it]

P. Giordano, G. Laguardia

[giordanopietro@tiscalinet.it], [laguardia@unibas.it]
Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente -Università della Basilicata. Potenza

Questo documento è ottenibile all'indirizzo:

http://www.polito.it/dip/ditic/webditic/Pagine_personali/Docenti/Claps/pubblicazioni.htm

SOMMARIO

Si è condotta una analisi geostatistica delle temperature medie annue e mensili finalizzata alla caratterizzazione del regime termometrico sul territorio italiano. A questo fine sono stati presi in considerazione dati di temperatura relativi a 754 stazioni, con copertura spaziale abbastanza omogenea sui circa 300.000 km² del territorio considerato. Obiettivo dell'analisi è la valutazione della media annua e dei valori medi mensili di temperatura in un generico punto del territorio nazionale in funzione di variabili esplicative geografiche e morfologiche. Sulla base di una precedente indagine relativa all'Italia meridionale, si è condotta una analisi di tipo stepwise regression, prestando particolare attenzione alla correlazione spaziale dei residui. Le variabili morfometriche sono state definite quantitativamente con l'ausilio di un modello digitale del terreno (GTOPO30, maglia di 1 km di lato). I fattori geografici e morfologici considerati sono stati quota, latitudine, distanza dal mare e concavità. La relazione trovata fra la temperatura media e le variabili citate spiega il 92% della varianza. Si è applicata la tecnica del kriging per aggiungere alla regressione una componente deterministica dovuta alla correlazione spaziale dei residui. Il regime termometrico (media dei 12 mesi) è stato riprodotto attraverso una serie di Fourier a due armoniche i cui coefficienti sono stati ricostruiti per regressione sui parametri geografici e morfologici. L'analisi degli errori di ricostruzione mostra che per molti scopi di natura tecnica il risultato ottenuto è più che soddisfacente, soprattutto in considerazione dell'ampiezza del territorio analizzato.

1 INTRODUZIONE: FATTORI GEOGRAFICI E MORFOLOGICI DI VARIABILITA' DELLA TEMPERATURA

In questo lavoro si è cercato di definire quantitativamente gli aspetti di variabilità spaziale delle temperature medie annue e mensili sull'intero territorio nazionale per fini di analisi climatiche in generale, e idrologiche in particolare. L'obiettivo è quello di trovare un modello che descriva in termini analitici le relazioni intercorrenti tra le temperature medie ed alcuni parametri geografici e morfologici, in modo da poter ricavare stime di temperatura in assenza di osservazioni. Un possibile campo di applicazione idrologica è quello dei metodi finalizzati alla valutazione distribuita di parametri dipendenti dalla temperatura, quali evapotraspirazione ed indici climatici.

In letteratura esistono indagini su vasta scala sulla variabilità spaziale di grandezze climatiche, tra cui anche la temperatura, in relazione ai fattori che le influenzano. In riferimento alla temperatura, i modelli prevalentemente utilizzati si basano sull'impiego di soli parametri di quota e latitudine e la relazione analitica maggiormente utilizzata è una regressione lineare. È ben noto il fenomeno fisico secondo cui aumentando di quota la temperatura diminuisce, in quanto l'effetto di riscaldamento esercitato dalla radiazione aumenta con la densità del mezzo attraversato. Inoltre, aumentando la latitudine l'altezza del sole sull'orizzonte diventa sempre minore e quindi si ha una variazione della durata e dell'intensità dell'insolazione.

Susmel (1990) osserva che i fattori che a più grande scala influenzano la distribuzione spaziale della temperatura sono la posizione geografica (latitudine) e la posizione rispetto ai mari ed ai continenti. A scala locale hanno influenza fattori terrestri, quali esposizione e morfologia, atmosferici, quali umidità, precipitazione e vento, e marittimi, quali configurazione e direzione delle coste e delle correnti marine (Pinna, 1977). La dislocazione delle grandi distese d'acqua e delle masse continentali condiziona l'andamento delle isoterme per il diverso calore specifico dei due mezzi, acqua e terra emersa. Questa peculiarità assicura ai paesi posti in riva al mare, o in sua vicinanza, una grande uniformità e costanza della temperatura, elevando alquanto la media termica annua, ma in special modo riavvicinando gli estremi.

In riferimento all'influenza dei fattori geografico-morfologici è possibile operare un primo riconoscimento dei tipi climatici che caratterizzano il territorio. Seguendo i criteri concettuali di W. Köppen, successivamente rielaborati da M. Pinna (1977), la diversità dei climi italiani è riconducibile ad almeno 8 tipi principali, riuniti in 3 grandi gruppi: temperato, temperato freddo e freddo.

2 LA DISTRIBUZIONE DELLE TEMPERATURE MEDIE IN ITALIA: OSSERVAZIONI ED ANALISI PRECEDENTI

L'Italia si sviluppa per circa 10°30' in latitudine, pari circa a 1200 Km, e 11° in longitudine. Le coste della Sicilia distano poche centinaia di chilometri dall'Africa, mentre il confine settentrionale fa parte dell'Europa continentale. Ciò implica una forte diversità di ambienti e situazioni geografiche con notevole influenza sul parametro climatico temperatura.

Dall'analisi della cartografia termometrica prodotta dal Servizio Idrografico riferita al periodo 1926 -1955 (Fig. 1) la caratteristica che risulta più evidente è la generale tendenza delle linee di uguale temperatura a disporsi secondo le isoipse. Tale legge di dipendenza della temperatura dall'*altitudine* è particolarmente manifesta lungo l'arco alpino, ma appare ben evidente anche in diversi settori della catena appenninica, particolarmente in corrispondenza dei rilievi più elevati ed in alcuni gruppi montuosi delle isole maggiori.

Tra le cause che condizionano la distribuzione geografica della temperatura si è fatto cenno finora al fattore altimetrico ed alla latitudine. Vi sono però altri fattori, ben noti in letteratura, che esercitano una influenza non trascurabile sulle condizioni termiche in Italia. Tra queste, un peso significativo è dato dall'*influenza del mare*. L'Italia si protende tutta entro il Mediterraneo; la funzione termoregolatrice da esso esercitata non è costante lungo tutto il litorale, poiché si attenua sull'Adriatico settentrionale. Il Tirreno e lo Ionio hanno invece un'influenza mitigatrice ben maggiore in quanto più profondi e più aperti alle influenze meridionali. Per queste ragioni e per il fatto di essere direttamente esposte alle correnti atmosferiche fredde del primo quadrante, le coste venete, emiliane e marchigiane, a parità di latitudine, sono più fredde di quelle liguri e tirreniche.

Bisogna tener conto, inoltre, dell'influenza esercitata dalla presenza del *sistema alpino* che si distende ad arco intorno alla pianura padano-veneta e la protegge dai venti freddi settentrionali (Fabris, 1938). Le Alpi modificano le condizioni termiche di certe masse d'aria che le investono, facendo assumere loro una

temperatura superiore a quella di origine, come avviene per le correnti di *föhn*, che non poco contribuiscono a far innalzare la temperatura media all'interno di alcune grandi vallate alpine (Bossolasco, 1950). Correnti di *föhn* giungono con una certa frequenza anche sull'alta pianura padana, contribuendo ad innalzarvi la temperatura nei mesi primaverili (Eredia, 1942).



Figura 1. Carta della temperatura media annua in Italia secondo F. Eredia (1942).

Eguale importante è la presenza della *catena appenninica*, che crea le differenze climatiche, in alcuni punti ben marcate, tra il versante tirrenico e adriatico. L'Appennino determina tale opposizione soprattutto nel settore settentrionale e centrale, mentre a sud di una linea che unisce Gaeta a Vasto non vi sono

praticamente differenze fra i due litorali della penisola, a parte, ovviamente quanto deriva dai caratteri del rilievo.

Ha grande importanza poi la *circolazione dei venti dominanti*, diversi da regione a regione, come la bora nell'Alto Adriatico, il maestrale in Sardegna, il libeccio lungo il litorale tirrenico della penisola e lo scirocco nell'Italia meridionale e in Sicilia, poiché questi venti apportano aria con differente grado di temperatura: fredda quelli provenienti dai quadranti settentrionali, calda quelli di sud, influenzando in tal modo, e ben spesso in maniera determinante, il clima delle singole regioni. L'influsso dei venti di mezzogiorno e di scirocco appare più manifesto che altrove sulle coste calabresi e siciliane, nelle quali si registrano temperature medie annue superiori a 18°C.

Ha grande importanza poi la *circolazione dei venti dominanti*, diversi da regione a regione, come la bora nell'Alto Adriatico, il maestrale in Sardegna, il libeccio lungo il litorale tirrenico della penisola e lo scirocco nell'Italia meridionale e in Sicilia, poiché questi venti apportano aria con differente grado di temperatura: fredda quelli provenienti dai quadranti settentrionali, calda quelli di sud, influenzando in tal modo, e ben spesso in maniera determinante, il clima delle singole regioni. L'influsso dei venti di mezzogiorno e di scirocco appare più manifesto che altrove sulle coste calabresi e siciliane, nelle quali si registrano temperature medie annue superiori a 18°C.

Vi sono altri fattori che esercitano influenza secondaria ed altri che, pur essendo dei potenti regolatori della temperatura dell'aria, agiscono solo su un'area limitata. Tra i fattori locali sono da ricordare i laghi, specie se di notevole estensione come i laghi prealpini, i quali esercitano un'azione mitigatrice sulla temperatura delle zone circostanti. L'andamento delle isoterme nella zona di contatto tra le Prealpi e l'alta pianura padana mette bene in risalto questa influenza.

Nel ripercorrere precedenti analisi su questo argomento è doveroso premettere che tutti i lavori hanno interessato aree limitate rispetto all'intero territorio nazionale. Le variabili esplicative considerate in relazione alla distribuzione delle temperatura risultano dunque in numero relativamente limitato, in quanto le zone esaminate presentano caratteristiche omogenee.

Gentili (1959) ha applicato il metodo della correlazione statistica ai dati termometrici di 30 stazioni toscane, analizzando la correlazione tra l'altitudine ed il valore della temperatura media annua, ottenendo un R^2 pari a 0,889. Successivamente l'autore ha preso in considerazione la forma del rilievo, notando che, a parità di quota, le forme topografiche concave presentano anomalie negative a causa del ristagno di aria fredda. Definendo un *indice topografico* ed assegnando ad esso, soggettivamente, valori compresi tra +5 e -5 (vette e conche), Gentili ha ottenuto un significativo miglioramento delle relazioni precedenti.

Lo stesso procedimento è stato applicato da Paiero (1968) per la stima della temperatura media annua relativa a 36 stazioni delle Prealpi Giulie. La relazione con la quota fornisce un R^2 pari a 0,9147. Ricorrendo al già citato *indice topografico*, Paiero ha ottenuto un incremento del coefficiente di correlazione fino al valore $R^2=0,9712$.

Claps e Sileo (2001) hanno condotto un'analisi statistica sulle temperature medie mensili ed annue finalizzate alla caratterizzazione del regime termometrico nelle regioni dell'Italia meridionale peninsulare

(Campania, Puglia, Basilicata e Calabria). Allo scopo, sono stati presi in considerazione dati di temperatura relativi ad 80 stazioni termometriche del S.I.M.N. con almeno 20 anni di osservazioni e con distribuzione omogenea su tutto il territorio considerato, che copre circa 60.000 Km². Dall'analisi sono state tuttavia escluse le stazioni che presentano distanza minima dalla linea di costa inferiore ai 10 Km, in quanto fonti di elevata incertezza rispetto al valore assunto dalla temperatura al livello del mare e poco significative rispetto alla determinazione di grandezze climatiche caratteristiche di bacini idrografici.

La dipendenza della temperatura media annua dalla quota, e dalla latitudine (*Lat*, in gradi sessadecimali), che varia dai 42° ai 38° Nord, ha evidenziato una relazione del tipo:

$$T_a = 33.73 - 0.0063 Z - 0.4091 Lat$$

con $R^2=0,9455$. Dall'analisi dei residui risulta che l'errore assoluto massimo è contenuto entro 1°C.

E' stato poi considerato l'andamento della media mensile (regime termometrico), rappresentandolo attraverso una serie di Fourier con una sola armonica, in cui i due parametri di ampiezza e fase sono stati correlati alla quota della stazione. Dall'analisi degli errori di ricostruzione, peraltro generalmente accettabili, emerge l'opportunità di considerare aspetti legati alla morfologia del territorio, per tener conto che alcune stazioni, ubicate in valli strette o profonde o su piccoli altopiani dominati da rilievi vicini, presentano forti scarti negativi rispetto alla relazione lineare.

Nei lavori fin qui citati la componente di latitudine è trascurata in aree limitate e, quando si introduce un indice di forma del rilievo, questo è desunto in modo soggettivo. Nel presente lavoro si intende ricercare, più in generale, legami correlativi tra le temperature medie annue e mensili ed i fattori fisico- morfometrici citati in introduzione, utilizzando anche l'analisi di Claps e Sileo (2001) come base di partenza per rilevare quantitativamente l'influenza della quota sul regime termometrico (medie mensili relative).

3 INDIVIDUAZIONE DELLE VARIABILI GEOGRAFICHE E MORFOMETRICHE ESPLICATIVE

In questo lavoro cerca di definire, facendo riferimento alla letteratura climatologica, i parametri geografici e morfologici che possono influenzare le temperature medie annue. Un esempio che può chiarire le modalità di definizione di tali variabili è quello dell'approccio di Prudhomme e Reed (1999) alla definizione di un modello di distribuzione di piovosità estrema nelle regioni montane della Scozia. In esso, gli autori hanno attuato una tecnica di *georegressione* utilizzando poi il kriging per completare la mappatura della variabile di interesse. Condizione necessaria per costruire il modello era quella di definire numericamente delle variabili topografiche potenzialmente influenti sulla distribuzione delle precipitazioni estreme sul territorio. Le variabili topografiche usate nelle georegressioni provengono da un DTM (modello digitale del terreno) a 1 KM e sono state calcolate per le 8 direzioni Cardinali (N NE E SE...). In alcuni casi sono state usate due direzioni aggiuntive che rappresentano la prevalenza del vento (WSW ENE). Tali variabili sono state calcolate con riferimento a valori determinati lungo linee rette, eventualmente poco rappresentative di particolari configurazioni geografiche (specie con riferimento alle precipitazioni). Alternativamente,

Faulkner Prudhomme (1998) avevano proposto di mediare le variabili su un settore a 90° centrato in ognuna delle d direzioni Cardinali (N NE E....), individuando 11 direzioni secondarie con angolo α rispetto alla direzione 'd' fissata.

Nel presente caso, si è usata la prima tecnica (valori determinati lungo le rette relative alle 8 direzioni cardinali) per definire variabili morfologiche e geografiche eventualmente rappresentative della variabilità spaziale delle temperature. Come base cartografica e morfologica si è utilizzato il modello digitale del terreno (DTM) prodotto dall'USGS (United States Geological Survey) denominato *GTOPO30*, con pixel di 1 Km di lato, disponibile in rete all'URL <http://edcdaac.usgs.gov/>. In base a questo DTM è stata anche definita la linea di costa, che si vedrà essere utile per determinare indici di distanza delle stazioni dal mare.

3.1 Variabili geografiche calcolate a scala nazionale

Nella definizione delle variabili territoriali di interesse si sono inizialmente considerate grandezze riferite alla posizione delle stazioni relativamente al mare. Si sono messi a punto algoritmi in grado di definire, per una stazione qualsiasi le seguenti grandezze fondamentali:

- distanza dal mare nelle otto direzioni cardinali;
- distanza minima dal mare;
- direzione corrispondente alla distanza minima.

per valutare quali combinazioni di queste potessero rivelarsi rappresentative rispetto alla variabilità della temperatura.

Una prima variabile introdotta è

$$MARE_MEDGEO = \sqrt[8]{d_1 * d_2 * \dots * d_8}$$

calcolata come media geometrica della distanza dal mare nelle otto direzioni cardinali. Essa permette di discriminare fra località che, pur avendo uguale distanza minima dal mare, ne risentono l'effetto in modo differente. Di fatto rappresenta un indice di continentalità.

Una seconda variabile tende ad evidenziare l'effetto dell'esposizione della linea di costa (che si esplica sulla temperatura tramite l'influenza tipica di correnti fredde o calde). Si tratta della variabile

$$ESPSEA = 10^{\cos \beta} / (1 + d_{min}),$$

che porta in conto (inversamente) anche l'effetto della distanza dal mare per poter essere applicata a tutte le stazioni e non solo a quelle poste sulla costa. Con d_{min} si è indicata la distanza minima dal mare, con β si è rappresentato l'angolo fra la direzione del vettore corrispondente alla distanza minima e il sud. Questa variabile riesce a pesare abbastanza bene anche le diverse caratteristiche termometriche delle stazioni adriatiche rispetto a quelle tirreniche e ioniche (v. Fig. 2).

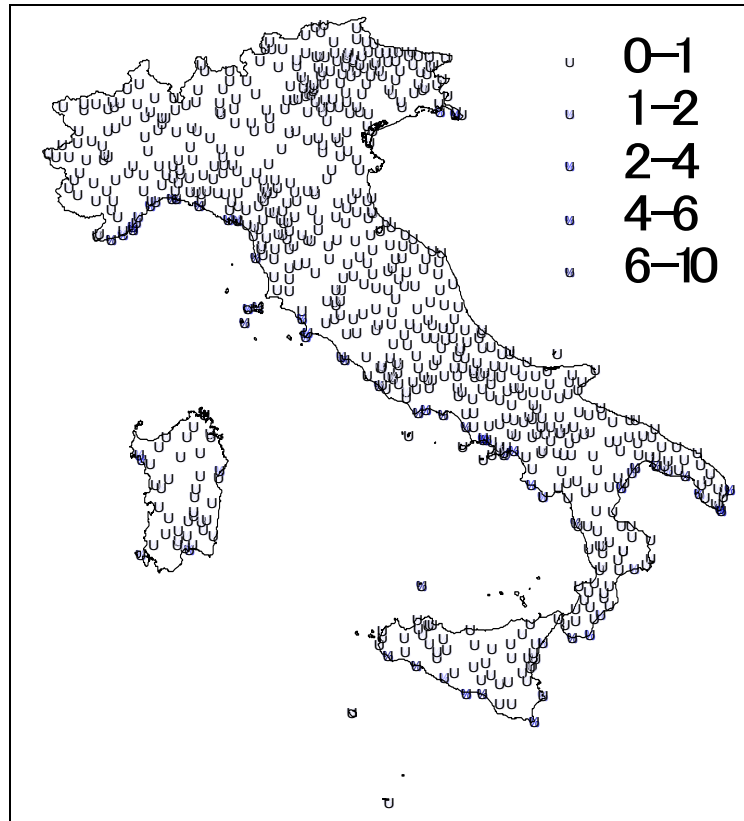


Figura 2. Distribuzione spaziale della variabile ESPSEA.

Con riferimento a variabili di tipo morfologico, si è proceduto sulla scorta di quanto suggerito da Prudhomme e Faulkner (1998), che hanno utilizzato il concetto di *obstruction* attraverso l'angolo α_i sotteso nella direzione i -esima dalla più alta barriera topografica. L' *obstruction* è espresso come $\text{tg } \alpha = \Delta H / \Delta X$, dove ΔH è la differenza di quota tra il pixel "barriera" e quello a cui appartiene la stazione, e ΔX è la distanza tra i due pixel.

Nella presente analisi questo concetto è stato utilizzato per definire la variabile

$$I_{top10} = \sqrt[8]{\prod_{i=1}^8 10^{2\text{tg}\alpha_i}},$$

ottenuta in base alla media pesata sulle 8 direzioni del suddetto indice di *obstruction*. Con questo parametro si vuole dare una definizione quantitativa della concavità del territorio, che Gentili (1959) aveva empiricamente espresso in termini di *indice topografico*. La variabile I_{top10} permette di individuare le località allocate all'interno di valli o conche, che possono influenzare significativamente il regime termometrico. Le stazioni caratterizzate dall'avere un elevato indice topografico sono ovviamente localizzate nelle strette vallate alpine. (V. Tab. 1 e Fig. 3)

Valori significativi di I_{top10} si riscontrano anche in alcune stazioni appenniniche, come ad es. Balsorano (AQ), ubicata in una valle stretta (Val Roveto) ai confini tra Lazio e Abruzzo. Claps e Sileo (2001) avevano già segnalato alcune stazioni, tra cui Balsorano, caratterizzate da anomalia termometrica negativa (v. tab. 2). Esaminando l'indice topografico di queste stazioni si evince che valori al di sopra della media si hanno solo

per Capistrello e Casalbuono, effettivamente ubicate in vallate relativamente strette, mentre le altre due stazioni non presentano valori di *Itop10* particolarmente elevati.

Stazione	<i>Itop10</i>	Stazione	<i>Itop10</i>	Stazione	<i>Itop10</i>
Chiusaforte	4.076	Finestrelle	3.128	Sondrio	2.700
Cimolais	3.675	Mezzolombardo	3.103	Crissolo	2.675
Peio	3.511	Ceresole Reale	3.085	Auronzo di Cadore	2.673
Brusson	3.459	Imer	3.067	Pieve di Cadore	2.667
Gressoney-La -Trinitè	3.458	Riva del Garda	3.018	Sesto	2.667
Campodolcino	3.339	Longarone	2.911	Valpelline	2.663
Moso in Passiria	3.304	Chiavenna	2.885	Forni di Sopra	2.654
Brennero	3.238	Silandro	2.878	Ravascletto	2.630
Courmayeur	3.232	Riva Valdobbia	2.812	Paluzza	2.567
Usseglio	3.180	Moncenisio	2.766	Predazzo	2.554
Campo Tures	3.142	Breno	2.753		

Tabella 1. Stazioni con *Itop10*>2.5.

Località	<i>Itop10</i>
Balsorano (AQ)	2.169
Capistrello (AQ)	1.390
S.Pietro Avellana (IS)	1.141
Casalbuono (SA)	1.350
Serra San Bruno (VV)	1,226

Tabella 2. Indice topografico per le stazioni appenniniche segnalate da Claps e Sileo (2001).

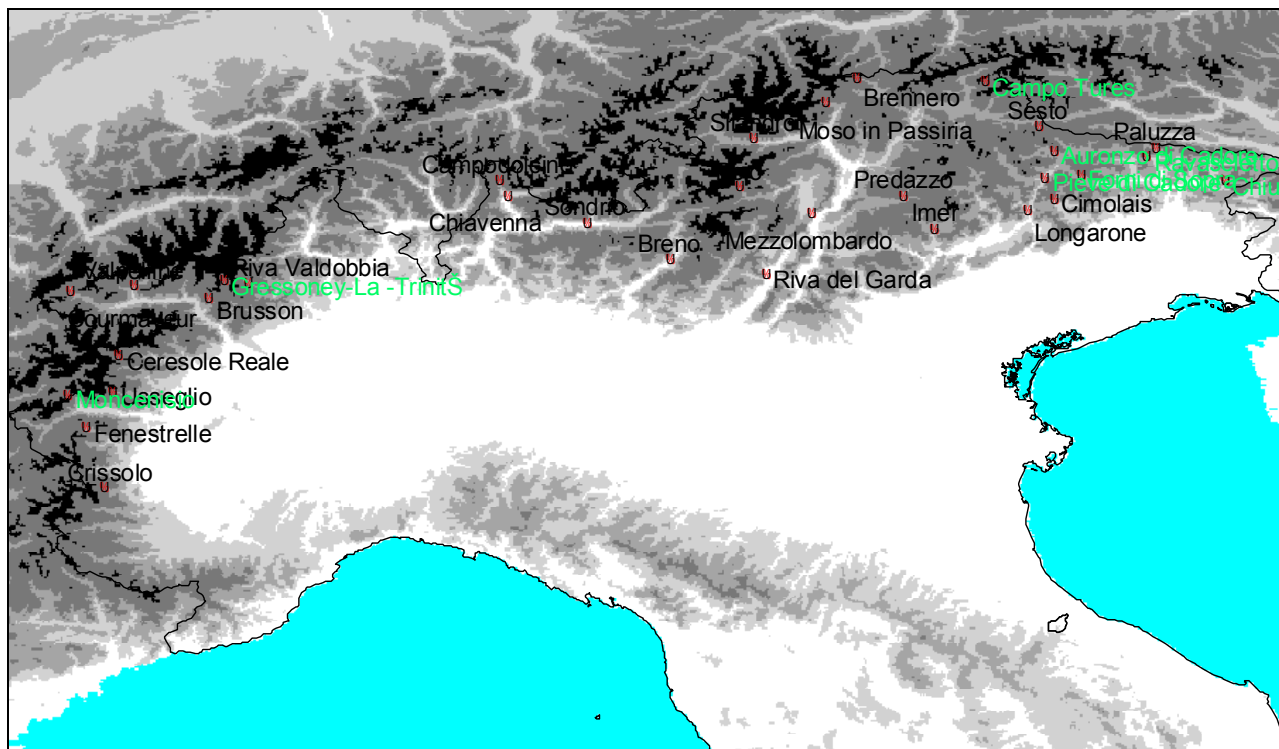


Figura 3. Stazioni con *Itop10*>2.5.

Con riferimento alle stazioni prealpine Friulane considerate da Paiero (1968), si sono confrontati gli indici topografici soggetti da egli assegnati con il parametro *I_{top10}* (v. Fig. 4 e Tab. 3). In Tab. 3 si valuta qualitativamente, in base all'ordine assunto dalle stazioni rispetto all'indice *I_{top10}*, la corrispondenza del valore di indice topografico, che assume valori inversamente proporzionali al grado di concavità della morfologia intorno alla stazione. Dal confronto emerge una corrispondenza abbastanza accettabile tra i valori delle due grandezze.

<i>Località</i>	<i>I_{top10}</i>	<i>I_{r-Paiero}</i>	<i>Località</i>	<i>I_{top10}</i>	<i>I_{r-Paiero}</i>
Grado	1.039	2	Tramonti di Sopra	1.727	2
Sesto al Reghena	1.059	-3	Tarvisio	1.748	-5
Trieste	1.082	2	Paularo	1.84	3
Moruzzo	1.09	1	Tolmezzo	1.855	-3
Gorizia	1.146	4	Sauris	1.875	3
Cividale	1.154	-3	Forni Avoltri	2.091	-2
Aviano	1.185	2	Pontebba	2.252	-5
Maniago	1.365	1	Forni Sopra	2.654	-2
Claut	1.703	-5	Cimolais	3.675	-3

Tabella 3. Confronto tra *I_{top10}* e gli indici topografici individuati da Paiero (in grassetto sono evidenziate le stazioni in cui non c'è corrispondenza tra gli indici).

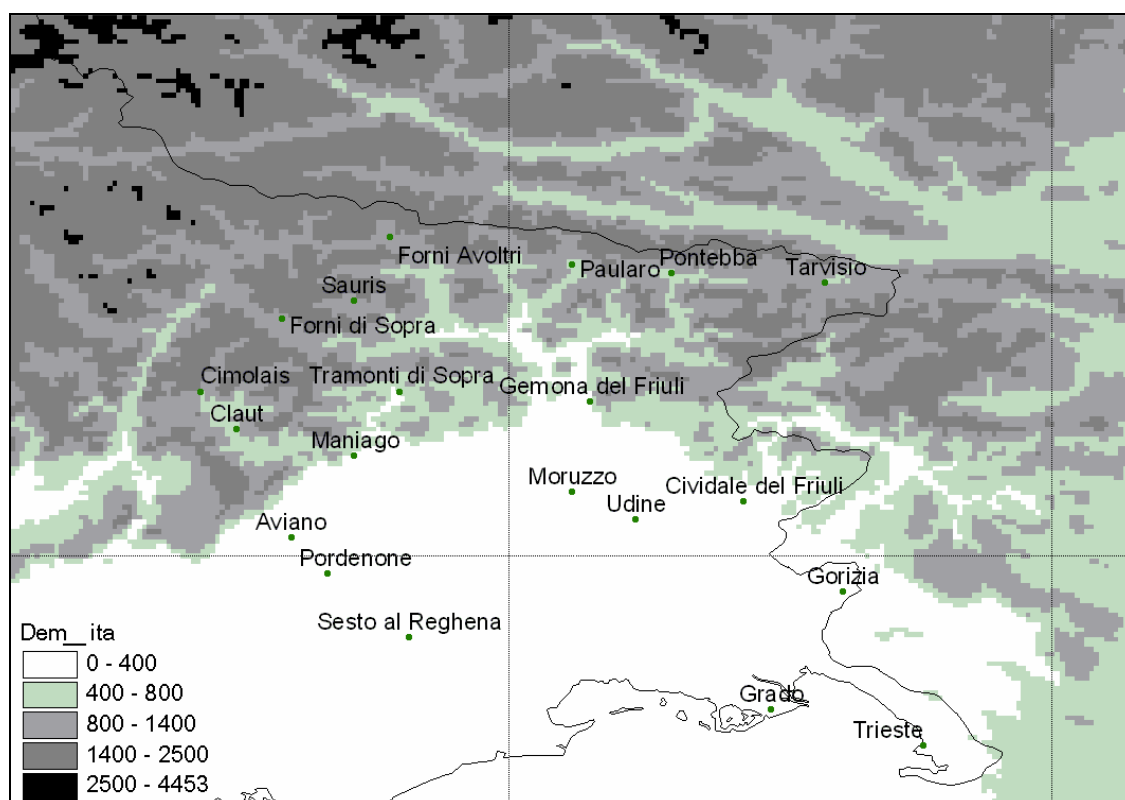


Figura 4. Stazioni prealpine Friulane analizzate da Paiero (1968).

4 ANALISI DELLA TEMPERATURA MEDIA

4.1 Dati utilizzati

Sono stati utilizzati i dati provenienti da una raccolta coordinata dall'ENEA (Petrarca et al., 1999) relativi a 738 stazioni termometriche distribuite sull'intero territorio nazionale. A questo database sono stati aggiunti i dati di alcune stazioni termometriche utilizzate da Claps e Sileo (2001) non incluse nel database ENEA, in modo da avere un riferimento omogeneo sulle regioni meridionali. Si è raggiunto così un totale di 754 stazioni. I dati provenienti dal database ENEA sono rappresentativi di serie storiche almeno trentennali per quanto riguarda le stazioni del SIMN (trentennio 1926-1955) ed almeno decennali per le altre. Di norma, le serie utilizzate presentano una consistenza significativa nel periodo 1951-1967 (archivio ENEA-DBT). Maggiori dettagli sono reperibili sulla relazione di accompagnamento del lavoro citato, che per quanto a conoscenza degli autori, rappresenta l'unica raccolta coordinata e sistematica di temperature medie sul territorio nazionale.

E' opportuno evidenziare che il database utilizzato fa riferimento in larga misura a stazioni urbane. Il numero di stazioni si riduce fortemente con la quota: oltre quota 1200 m s.l.m. si trova solo il 7% delle stazioni a fronte di una superficie pari al 12% dell'intero territorio nazionale (v. Tab.4). In Fig. 5 si è rappresentata la distribuzione geografica delle stazioni considerate.

Fascia altimetrica	Numero stazioni	% Stazioni	% Area
H<100	212	28.11	23
100<H<800	404	53.58	54
800<H<1200	83	11.00	11
H>1200	55	7.29	12

Tabella 4. Distribuzione delle stazioni termometriche e della superficie del territorio nazionale rispetto alla quota.

4.2 Applicazione della stepwise regression su scala nazionale

La temperatura media annua è stata rapportata alle variabili geografiche e morfologiche prima descritte tramite un modello di regressione multipla applicato con procedura *stepwise*. Nella relazione finale sono state utilizzate la quota, la latitudine e le variabili geografiche e morfologiche introdotte in precedenza. Sono state tuttavia testate anche altre variabili e trasformate, risultate scarsamente significative dal punto di vista statistico.

Tra queste ultime è opportuno menzionare la variabile dicotomica *dmin_140* (individua le stazioni che hanno una distanza minima dal mare maggiore di 140 Km, ovvero quelle ubicate lungo tutto l'arco alpino fino ai margini della pianura padana) che, per la particolare collocazione delle stazioni alpine considerate, potrebbe portare in conto gli effetti del föhn.

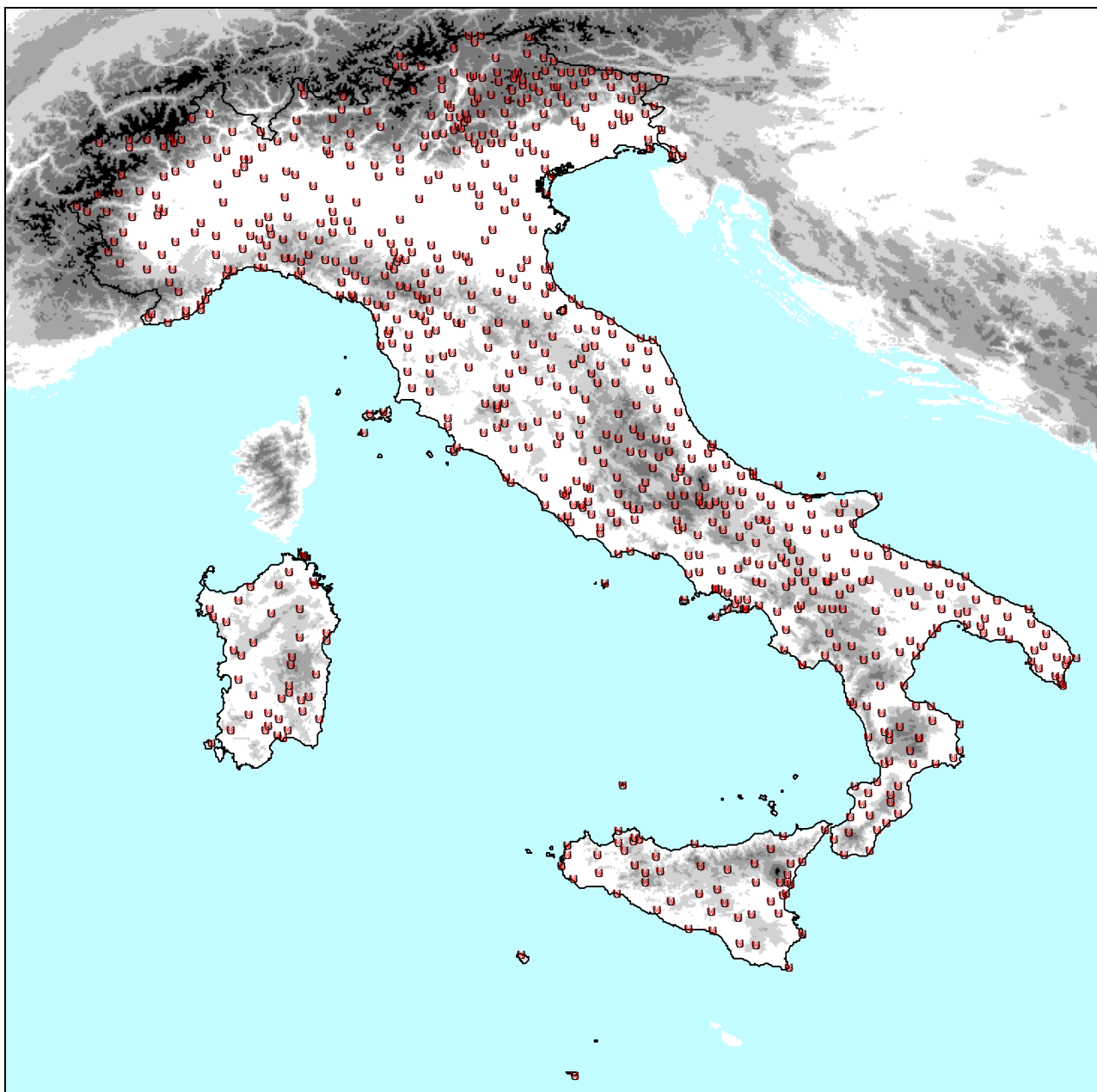


Figura 5. Ubicazione delle stazioni termometriche considerate.

In Tab. 5 è riportata la sintesi dei risultati della procedura stepwise. Oltre al coefficiente di determinazione (R^2), i coefficienti della regressione e gli indici T-Stat. di significatività delle variabili, è stato riportato il numero di stazioni con errore assoluto maggiore di 3, 2 ed 1°C ed inferiore a 0.5°C , in modo da dare una indicazione facilmente apprezzabile in relazione al miglioramento apportato dall'introduzione di una nuova variabile.

Si è dunque ottenuta la relazione:

$$T_a = 39.94 - 0,0053 Z - 0,5739 \text{ Lat} + 0,0011 \text{ MARE_MEDGEO} + 0.068 \text{ ESPSEA} + 0,1375 \text{ Itop10}$$

Il gradiente termico è di 1°C per ogni 190 m di quota, e di 0.57 per ogni grado di latitudine, in buon accordo con i valori di letteratura.

STEP	R ²	RESIDUI				Intercepta		QUOTA		LATITUDINE		MARE_MEDGEO		ESPSEA		ltop10	
		>3	>2	>1	<0.5	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T
1	0.6470	79	255	525	105	15.79111	156.11	-0.00641	-37.13								
2	0.9214	6	27	181	342	43.42752	80.14	-0.00543	-64.76	-0.65612	-51.20						
3	0.9235	6	23	186	339	39.98775	43.18	-0.00526	-58.14	-0.56959	-24.94	-0.00115	-4.55				
4	0.9245	6	24	182	342	40.11207	43.53	-0.00522	-57.26	-0.57490	-25.25	-0.00100	-3.93	0.07136	3.16		
5	0.9247	6	22	179	349	39.94334	43.05	-0.00527	-53.51	-0.57390	-25.22	-0.00112	-4.19	0.06801	3.00	0.13755	1.46

Tabella 5. Sintesi dei risultati della procedura stepwise regression per la stima della T media annua.

4.3 Analisi del residuo ed applicazione del Kriging

Dall'analisi dei residui (vedi Fig. 6) si evince che il numero di stazioni che hanno un residuo in valore assoluto maggiore di 1°C è pari a 179 ($\cong 23\%$). Si è verificato che la distribuzione dei residui segue la legge normale.

Poiché le stazioni sono ordinate secondo percorsi geografici contigui, è stato possibile utilizzare l'informazione rappresentata dall'autocorrelogramma (vedi Fig. 7). Da esso si evince che non è stata completamente eliminata la correlazione spaziale.

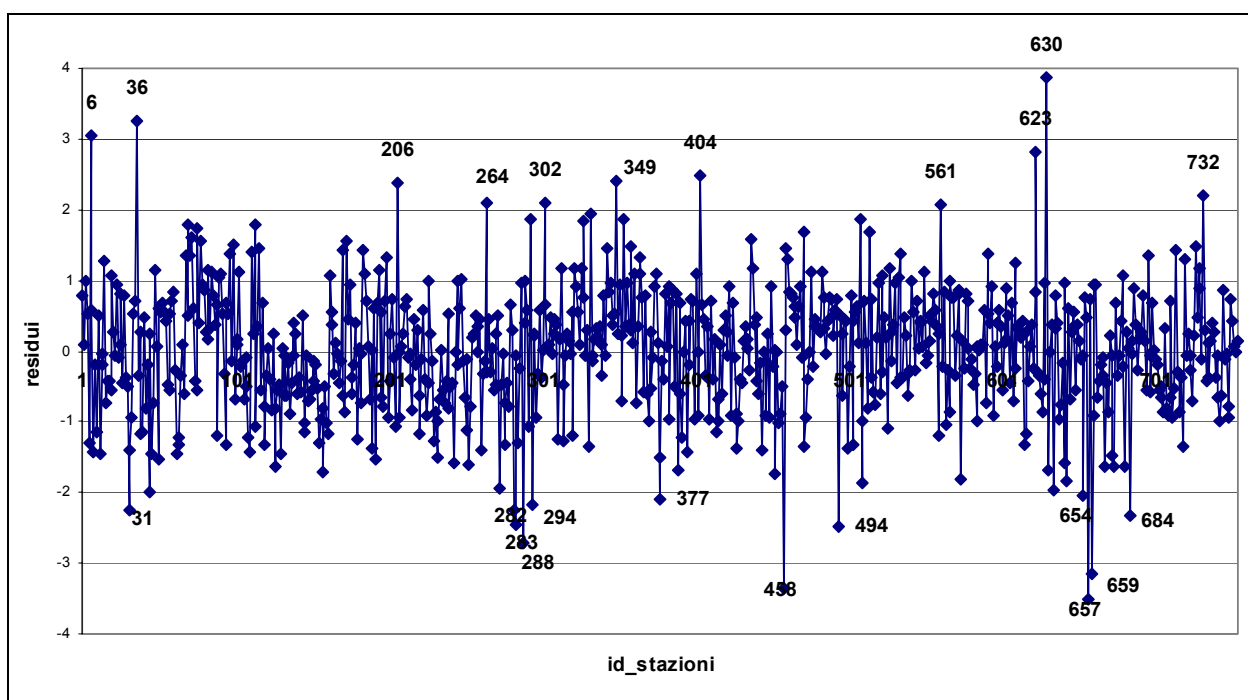


Figura 6. Residui della regressione multipla.

Per tener conto di questa ed utilizzarla in sede di ricostruzione dei valori in siti qualsiasi si è fatto ricorso al Kriging, che è un metodo di interpolazione lineare basato su un approccio statistico, che permette di ottimizzare in un assegnato punto P_0 la stima del valore di una variabile regionalizzata z , distribuita nello spazio e misurata in un certo numero di punti P_i .

In questo modo è possibile sommare al valore $\hat{Y}$ stimato tramite il modello di regressione, una componente correttiva che contiene l'informazione relativa alla correlazione spaziale non riprodotta nel modello.

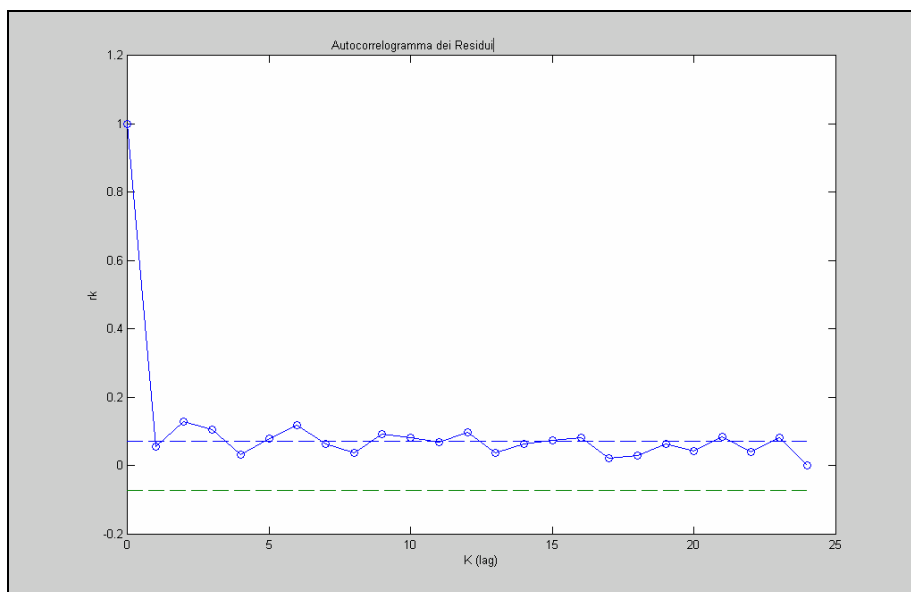


Figura 7. Autocorrelogramma dei residui

Il modello di regressione che conseguentemente si ottiene è il seguente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + e_{reg} = \hat{Y} + e_{reg}$$

dove la variabile dipendente Y è funzione di una combinazione lineare delle variabili X_j , a cui si aggiunge la componente residua e_{reg} regolarizzata tramite il metodo geostatistico.

L'analisi dei valori ricostruiti del residuo tramite kriging (Fig. 8) consente di riconoscere strutture di organizzazione spaziale della temperatura media, eventualmente riconducibili a criteri geografici in successivi approfondimenti.

5 TEMPERATURE MEDIE MENSILI: REGIME TERMOMETRICO E SUE RELAZIONI CON I PARAMETRI TERRITORIALI

Per regime termometrico si intende l'andamento delle temperature medie mensili nell'arco dell'anno, espresso attraverso i 12 valori medi mensili opportunamente adimensionalizzati.

La temperatura media mensile più bassa si riscontra in tutte le stazioni nel mese di gennaio; in alcune località peninsulari e insulari fortemente influenzate dall'azione del mare, la media di gennaio differisce di poco da quella di febbraio, mentre nelle località continentali il divario fra i due mesi si fa piuttosto sensibile, fino a raggiungere i 4°C. Tale differenza tende poi a ridursi nuovamente quando si passa dalle zone di pianura a quelle montane al di sopra dei 1000 m. Si può dire dunque che l'inverno è piuttosto breve nelle zone continentali, mentre dura più a lungo in montagna e lungo le coste, che risentono dell'effetto termoregolatore del mare.

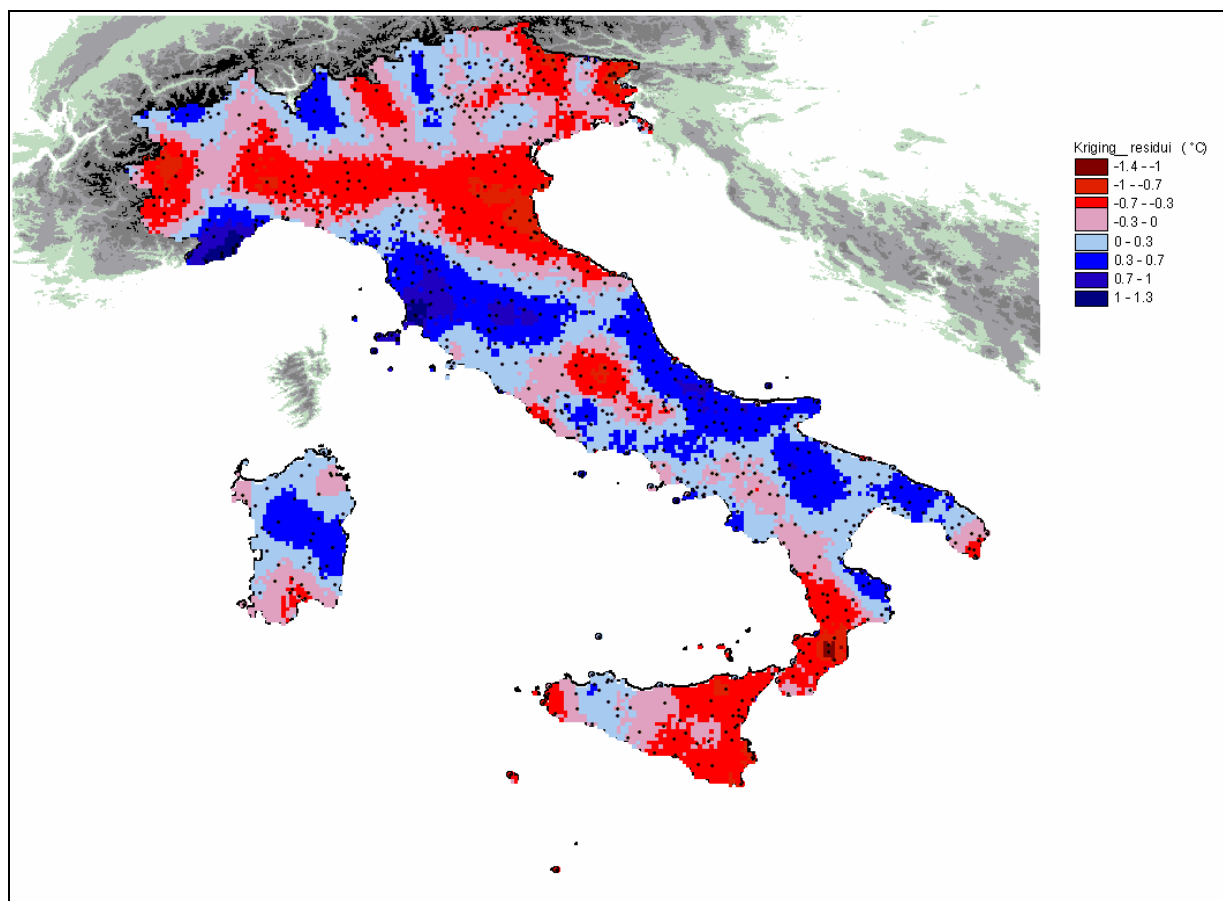


Figura 8. Distribuzione spaziale dei residui relativi alle medie annue ottenuta tramite kriging.

Per quanto riguarda i valori massimi, le regioni interne dell'Italia continentale sono caratterizzate dall'avere la media di luglio sensibilmente differente da quella di agosto. Tale differenza si riduce nell'Italia centrale per appiattirsi definitivamente nell'Italia meridionale e nelle isole. L'escursione termica, differenza fra la massima e la minima temperatura media mensile, varia nel territorio italiano fra 13 e 24°C, aumentando con il crescere della latitudine e della distanza dal mare e diminuendo con l'altitudine.

In Fig. 9 si riportano i valori medi mensili relativi ad un campione di 5 stazioni (Tab. 6), distribuite in diverse zone del territorio nazionale e con caratteristiche morfologiche differenziate, ad esemplificare il grado di variabilità delle curve osservabili sul campione complessivo.

Prov.	Comune	Quota (m s.l.m.)	Latitudine	Distanza minima dal mare (Km)
AO	Aosta	583	45.73	212
SO	Bormio	1225	46.46	304
AN	Ancona	103	43.61	1
SA	Battipaglia	72	40.60	10
CT	Catania	75	37.50	3

Tabella 6. Caratteristiche delle stazioni termometriche campione.

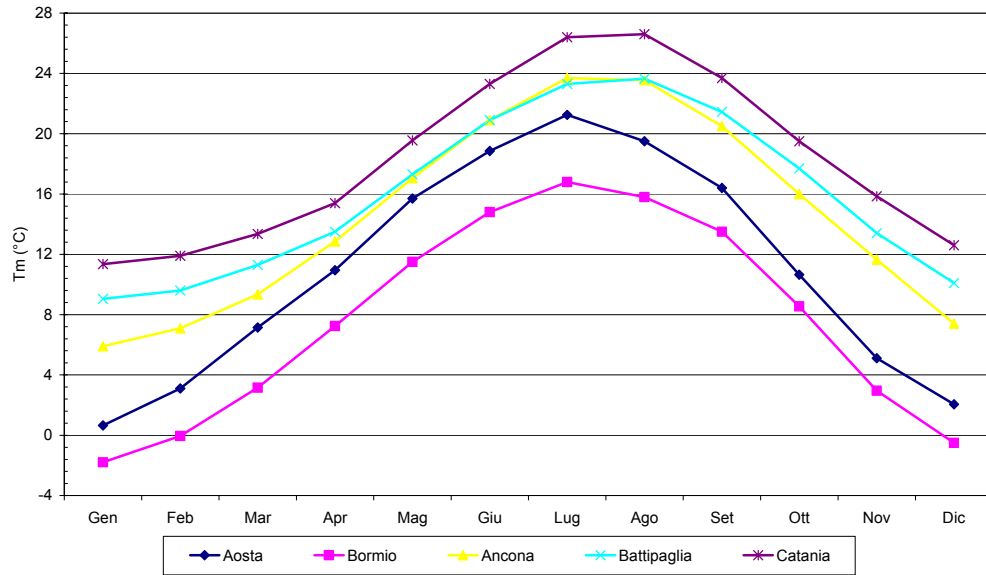


Figura 9. Temperature medie mensili per 5 stazioni campione, distribuite sull'intero territorio con differenti caratteristiche geografiche e morfologiche.

5.1 Regolarizzazione del regime termometrico tramite serie di Fourier

Il regime termometrico è stato analizzato mediante serie di Fourier, i cui coefficienti sono stati stimati sui dati mensili attraverso regressione multipla. Per la ricostruzione di questi coefficienti in un punto qualsiasi del territorio nazionale, essi sono stati correlati ai parametri geografici e morfologici descritti in precedenza.

La relazione descrittiva delle serie di Fourier:

$$T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{\tau} t + n\phi_n\right)$$

dove:

t = mese (1 ÷ 12); A_0 = media di $T(t)$ sul periodo τ ; $\tau = 12$, periodo; N = numero delle armoniche; A_n = ampiezza; ϕ_n = fase, è stata applicata a:

- Regime termometrico adimensionale $t(j)$ ottenuto dal rapporto fra la temperatura media mensile Tj e la temperatura media annua Ta (vedi Fig. 10);
- Regime termometrico a media zero: $T_0(j)$ ottenuto dalla differenza fra la temperatura media mensile Tj e la temperatura media annua Ta (vedi Fig. 11).

Nelle citate figure si nota che regime termometrico a media zero $T_0(j)$ presenta un andamento più regolare e meno variabile dell'altro, per cui si presta meglio alla modellazione.

Per la ricostruzione del regime termometrico a media zero si è inizialmente ricorso ad una serie di Fourier ad una armonica:

$$T_0(j) = A_0 + A \cos\left(\frac{2\pi}{12} j + \phi\right)$$

I parametri A e ϕ , stimati sui 12 dati di ogni stazione mediante il metodo dei minimi quadrati, sono stati poi correlati con le grandezze geografiche e morfologiche.

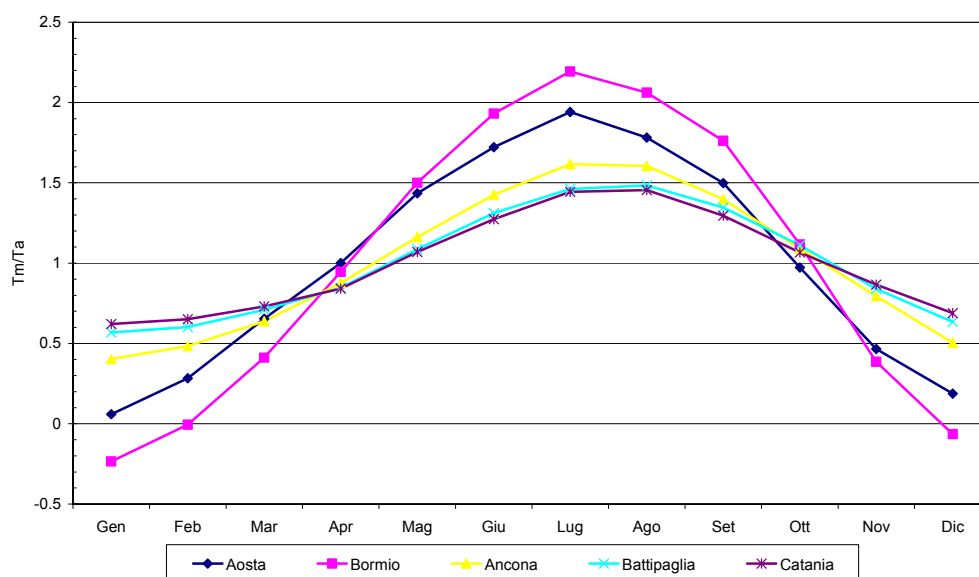


Figura 10. Regime termometrico a media 1 per 5 stazioni distribuite sull'intero territorio con diverse caratteristiche morfologiche.

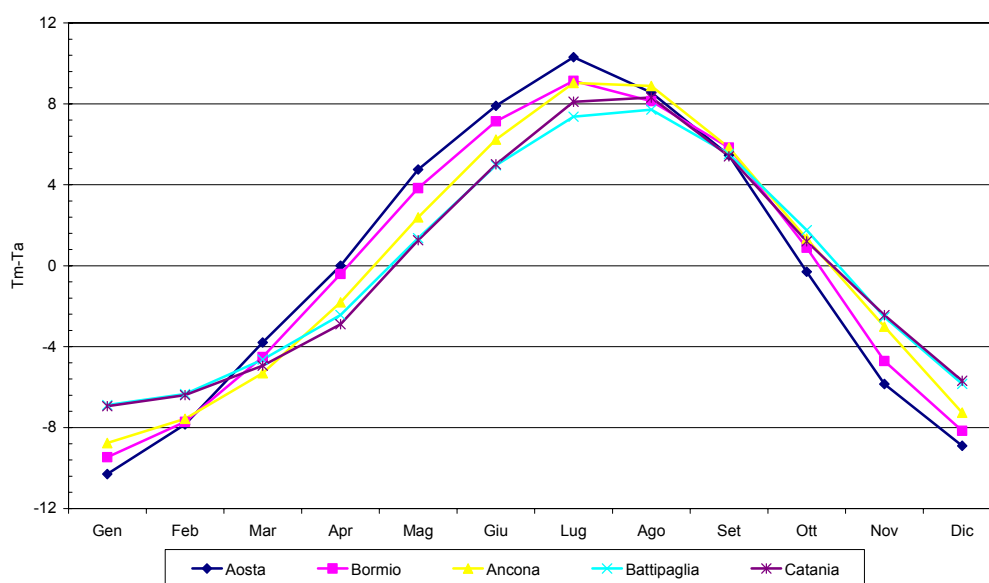


Figura 11. Regime termometrico a media 0 (ottenuto per differenza) per 5 stazioni distribuite sull'intero territorio con diverse caratteristiche morfologiche.

Poichè si ha a che fare con valori adimensionali, A_o assume valore zero. Restano quindi da stimare, tramite regressione multipla, i parametri A e ϕ .

La migliore stima dell'ampiezza A con riferimento ai dati del campione complessivo è risultata essere:

$$A = 4.34810 - 0.00042 \cdot Z + 0.11564 \cdot Lat + 0.00187 \cdot MARE_MEDGEO - 0.17411 \cdot ESPSEA - 0.45427 \cdot Itop10$$

La migliore stima della fase ϕ a scala nazionale è risultata essere:

$$\phi = 1.62359 - 0.00003 \cdot Z + 0.01938 \cdot Lat + 0.000122 \cdot MARE_MEDGEO - 0.00961 \cdot ESPSEA - 0.00894 \cdot Itop10$$

Nelle Tabb. 7 e 8 si riportano i risultati delle procedure stepwise.

STEP	R ²	Intercetta		QUOTA		LATITUDINE		MARE_MEDGEO		ESPSEA		Itop10	
		Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T
1	0.0038	8.87633	167.41	0.00015	1.70								
2	0.3992	-1.47590	-3.16	-0.00022	-2.98	0.24578	22.23						
3	0.5384	4.56858	7.96	-0.00050	-7.53	0.08347	5.75	0.00663	15.04				
4	0.5690	3.98205	7.10	-0.00057	-8.75	0.10417	7.28	0.00535	11.62	-0.13018	-7.28		
5	0.5758	4.34810	6.14	-0.00042	-5.62	0.11564	6.66	0.00187	9.19	-0.17411	-10.08	-0.45427	-6.33

Tabella 7. Sintesi dei risultati della procedura stepwise per l'ampiezza.

STEP	R ²	Intercetta		QUOTA		LATITUDINE		MARE_MEDGEO		ESPSEA		Itop10	
		Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T
1	0.0259	2.44208	529.07	0.00004	4.47								
2	0.7300	1.22596	44.44	-0.00001	-1.91	0.02887	44.25						
3	0.8074	1.62280	49.70	-0.00003	-7.11	0.01822	22.08	0.00044	17.36				
4	0.8162	1.59512	49.46	-0.00003	-8.05	0.01919	23.32	0.00038	14.16	-0.00614	-5.98		
5	0.8167	1.62360	38.61	-0.00003	-6.81	0.01938	18.79	0.00012	10.09	-0.00961	-9.36	-0.00894	-2.10

Tabella 8. Sintesi dei risultati della procedura stepwise per la fase.

Nella ricostruzione del regime termometrico con serie di Fourier ad una armonica si sono però riscontrate difficoltà nella rappresentazione dei valori estremi della curva, soprattutto quando tali valori tendono ad appiattirsi in due o più mesi consecutivi, nella fattispecie i mesi di gennaio e febbraio per il valore minimo, luglio e agosto per il massimo.

5.2 Regolarizzazione del regime termometrico tramite serie di Fourier a due armoniche

L'onda armonica ha la capacità di descrivere con buona approssimazione fenomeni sinusoidali caratterizzati da treni d'onda abbastanza lunghi rispetto al periodo τ , e riveste notevole importanza in virtù del principio di sovrapposizione: $f(j) = f_1(j) + f_2(j)$.

Per migliorare la riproduzione del regime termometrico si è deciso di utilizzare una serie di Fourier a due armoniche:

$$T_0(j) = A_0 + A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{12} j + \phi_1\right) + A_2 \cos\left(\frac{4\pi}{12} j + 2\phi_2\right)$$

Anche in questo caso i parametri A_2 e ϕ_2 , stimati sui dati mediante il metodo dei minimi quadrati, sono stati poi correlati con le grandezze geografiche e morfologiche. In questo caso, però, la variabile A_2 è risultata poco correlata alle citate grandezze territoriali. Si è, pertanto, scelto di considerare l'ampiezza A_2 costante e pari alla media:

$$A_2 = 0.7506$$

La deviazione standard del parametro A_2 è pari a 0.2039.

La migliore stima della fase ϕ_2 è invece risultata essere ($R^2=0.678$):

$$\phi_2 = 3.97003 + 0.00017 \cdot Z - 0.04441 \cdot Lat - 0.00043 \cdot MARE_MEDGEO$$

per la quale le fasi di regressione stepwise sono evidenziate in Tab. 9.

STEP	R ²	Intercepta		QUOTA		LATITUDINE		MARE_MEDGEO		ESPSEA		ltop10	
		Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T	Coeff.	Stat. T
1	0.0017	2.00176	147.86	-0.00003	-1.13								
2	0.6221	5.30904	56.14	0.00009	6.28	-0.07852	-35.11						
3	0.6344	4.84974	37.21	0.00011	7.55	-0.06619	-20.10	-0.00050	-5.03				
4	0.6355	4.87812	37.07	0.00012	7.69	-0.06719	-20.01	-0.00044	-4.09	0.00630	1.50		
5	0.6778	3.97003	25.98	0.00017	10.62	-0.04441	-11.85	-0.00043	-9.71	0.00620	1.66	-0.02509	-1.62

Tabella 9. Sintesi dei risultati della procedura stepwise per la fase della seconda armonica.

5.3 Qualità delle stime delle temperature medie mensili

I paragrafi precedenti hanno evidenziato il modello selezionato per la stima delle temperature medie mensili sul territorio Italiano, basato sull'impiego di relazioni lineari con grandezze geografiche e morfologiche. Dall'analisi degli indici che definiscono la qualità della stima emerge che il modello più efficiente a scala nazionale è quello applicato al regime termometrico a media zero tramite serie di Fourier a due armoniche.

Una volta che il regime termometrico è stato ricostruito, le temperature medie mensili stimate sono date da

$$\hat{T}_j = \hat{T} + \hat{T}_0(j).$$

Per il stabilire la rappresentatività delle stime così effettuate, si sono confrontate le medie mensili osservate e quelle stimate, utilizzando i seguenti indici:

- Errore quadratico medio (*RMSE*, root mean square error) di ricostruzione dei dodici valori medi mensili (Fig. 12):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} (T_j - \hat{T}_j)^2}$$

- Massimo errore relativo nell'ambito dei 12 mesi (Fig.13): $Max(T_j - \hat{T}_j)$

Utilizzando questi indici di errore si può dedurre sia l'entità dello scostamento in termine di regime termometrico (adimensionale) che le differenze emerse sulle medie mensili assolute.

Sull'intero campione esaminato, le caratteristiche dell'errore quadratico medio, risultante dall'applicazione del modello riferito al regime termometrico a media zero con due armoniche, sono le seguenti:

Massimo pari a 2.2 °C; Minimo pari a 0.12 °C; valore Medio pari a 0.53 °C.

Confrontando i valori ottenuti con quelli riferiti al regime a media zero ricostruito con una sola armonica, si osserva una riduzione della media complessiva del RMSE pari a 0.21°C.

Le caratteristiche statistiche dell'errore massimo sui dodici mesi [Err. Max], riferite al regime termometrico a media zero con due armoniche, sono le seguenti:

Massimo pari a 3.8 °C; Minimo pari a 0.22 °C; valore Medio pari a 0.99 °C.

Confrontando i valori ottenuti con quelli riferiti al regime a media zero ricostruito con una sola armonica, si osserva una riduzione della media complessiva pari 0.39°C .

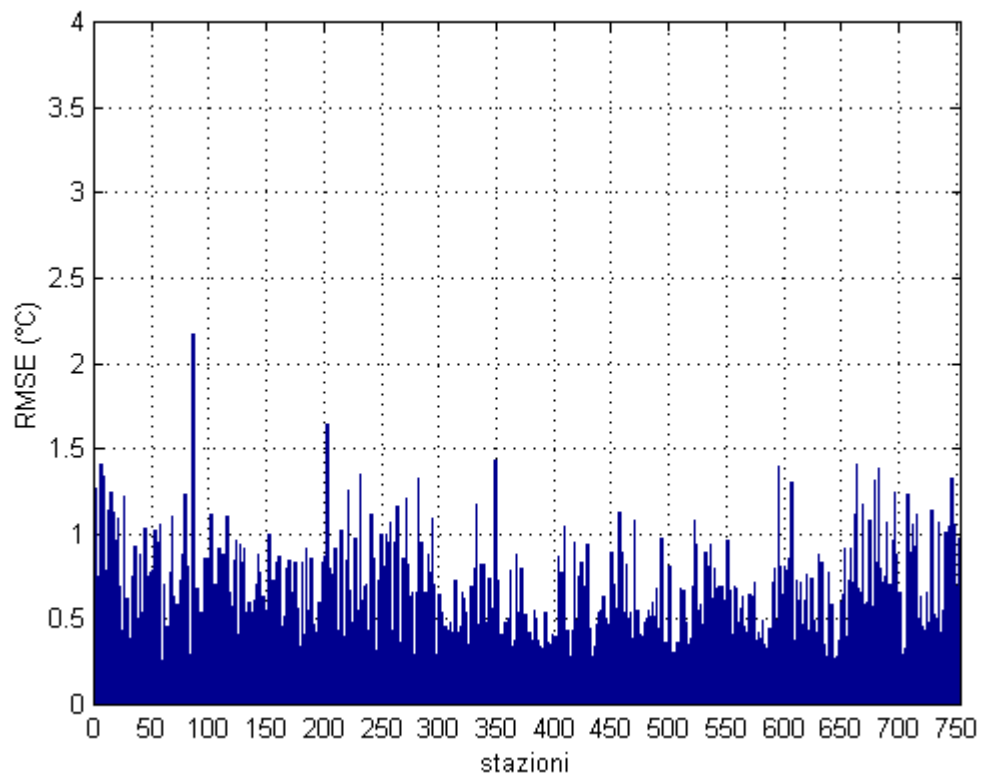


Figura 12: RMSE relativo al regime termometrico a media zero a due armoniche.

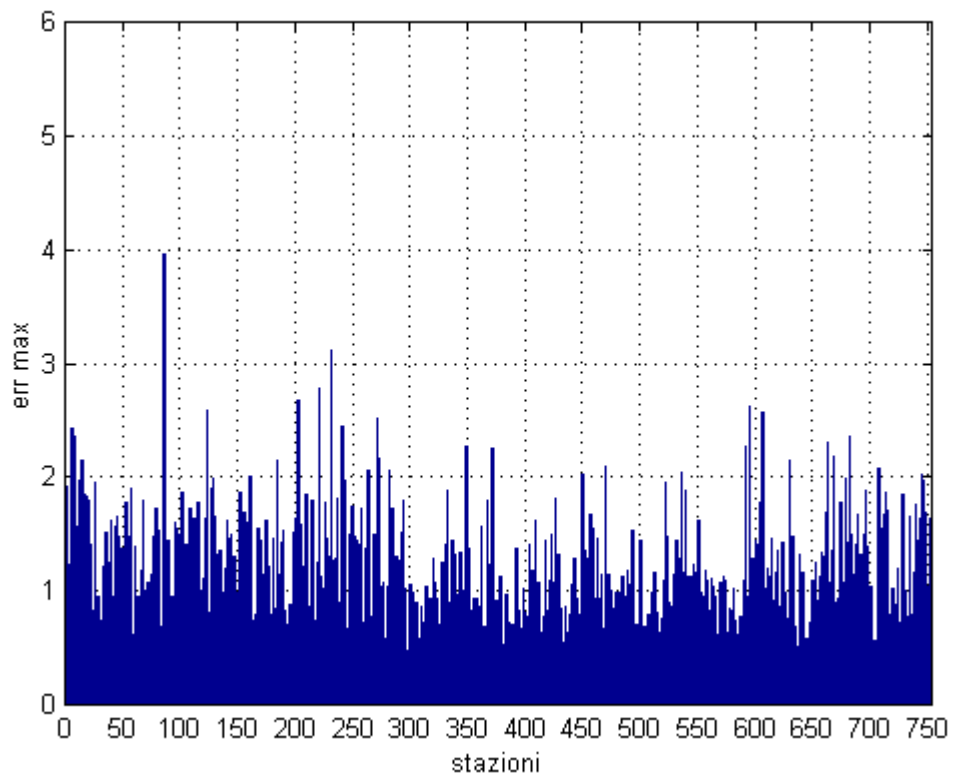


Figura 13. Errore massimo relativo al regime termometrico a media zero a due armoniche.

6 CONCLUSIONI

L'analisi condotta in questo lavoro ha interessato 754 stazioni termometriche con lo scopo di evidenziare relazioni che permettano di ricostruire le temperature medie mensili in un punto qualsiasi del territorio nazionale. Tale risultato è stato perseguito analizzando separatamente la variabilità spaziale della media annua e quella del regime termometrico, assunto come la sequenza delle deviazioni dei dodici dati medi mensili rispetto alla media annua.

La temperatura media annua varia sul territorio nazionale in base ad alcuni fattori geografici e morfologici, quali quota, latitudine, distanza dal mare, concavità, sui quali si è indagato mediante leggi di regressione lineare multipla, ed in base a fattori non noti, che danno luogo ad errori di ricostruzione dei dati osservati. La relazione trovata fra la temperatura media e le variabili geografiche citate spiega il 92% della varianza. Si è applicata la tecnica del kriging per aggiungere alla regressione una componente deterministica dovuta alla correlazione spaziale residua.

Il regime termometrico è stato riprodotto attraverso una serie di Fourier a due armoniche i cui coefficienti sono stati ricostruiti per regressione sui parametri geografici e morfologici.

Si potrebbero approfondire i fattori che producono correlazione spaziale dei residui, ad esempio migliorando la caratterizzazione della pianura padana o esaminando meglio l'effetto dei grandi laghi alpini o, ancora, indagando effetti legati alla distribuzione delle precipitazioni. Miglioramenti dei risultati ottenuti possono certamente derivare da una più accurata rappresentazione della morfologia del territorio. A tal fine è sicuramente utile incrementare la risoluzione spaziale del modello digitale del terreno utilizzato.

Ciò nonostante, l'analisi degli errori di ricostruzione mostra che per molti scopi di natura tecnica il risultato ottenuto è più che soddisfacente, soprattutto in considerazione dell'ampiezza del territorio analizzato.

È opportuno osservare che il presente studio si basa sull'utilizzo e la stima di grandezze supposte stazionarie. Ciò suggerisce una riflessione sul ruolo che i recenti numerosi segnali di incremento della temperatura a scala globale possono avere sulla validità del risultato. Nell'ipotesi che gli effetti del possibile incremento della temperatura globale si esplicino uniformemente sul territorio considerato, ciò non andrebbe comunque ad inficiare il principale obiettivo di questo lavoro: un eventuale incremento uniforme della temperatura media annua potrebbe essere esplicitamente considerato quale fattore di scala nelle relazioni trovate. Le variazioni climatiche potrebbero peraltro comportare sensibili modificazioni sul regime termometrico, con variazioni e spostamenti dei minimi e massimi mensili nell'anno; considerazioni del genere sono tuttavia al di là degli scopi di questo lavoro.

BIBLIOGRAFIA

Bossolasco M., *Il fohen delle Alpi Italiane*, Geofisica Pura e applicata, 1950.

Claps P., Sileo C., *Caratteri termometrici dell'Italia meridionale*, L'Acqua, 5, pp. 23-31, 2001.

- Eredia F., *Distribuzione della temperatura dell'aria in Italia nel decennio 1926-35*, Pubbl. N.21 del Servizio Idrografico Ministero LL.PP., 1942.
- Eredia F., *Il fohen nella Valle Padana e nelle Prealpi*, 1942.
- Eredia F., *Lo scirocco in Italia*, Annali Uff. Presagi, vol. V, pp.674-680, 1932.
- Fabris C., *Le Alpi come fattore meteorologico*, Ateneo Veneto, pp.99-108, 1938.
- Faulkner D.S. Prudhomme C., *Mapping an Index of extreme rainfall across the UK*, Hydrology and Earth System Science, 2(2-3), pp.183-194, 1998.
- Gentilli J., *Le Temperature montane in Toscana*, Rivista Geografica Italiana, LXVI-Fasc. IV, 1959.
- Giordano P., *Analisi quantitativa della distribuzione spaziale delle temperature medie in Italia*, Tesi di Laurea, 2002.
- Ministero dei Lavori Pubblici, *La distribuzione della temperatura dell'aria in Italia nel trentennio 1926-1955*, Pubblicazione n.21 del SIMN, Istituto Poligrafico dello Stato, II ed., 1969.
- Paiero P., *Stime delle temperature medie annue nelle Prealpi Giulie*, Italia Forestale e Montana, XXIV, pp.211-214, 1969.
- Petrarca S., Spinelli F., Cogliani E., Mancini M., *Profilo climatico dell'Italia*, ENEA, 1999.
- Pinna M., *Climatologia*, UTET, 1977.
- Prudhomme C. Reed D.W., Mapping extreme rainfall in a mountain region using geostatistical techniques: a case study in Scotland, *International Journal of Climatology*, 19, p.1337-1356, 1999.
- Susmel L., *Principi di Ecologia: Fattori Ecologici, Ecosistemica, Applicazione*, CLEUP, II ed., 1990.
- U.S. Geological Survey, *GTOPO30 Documentation*, <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/README.html> .